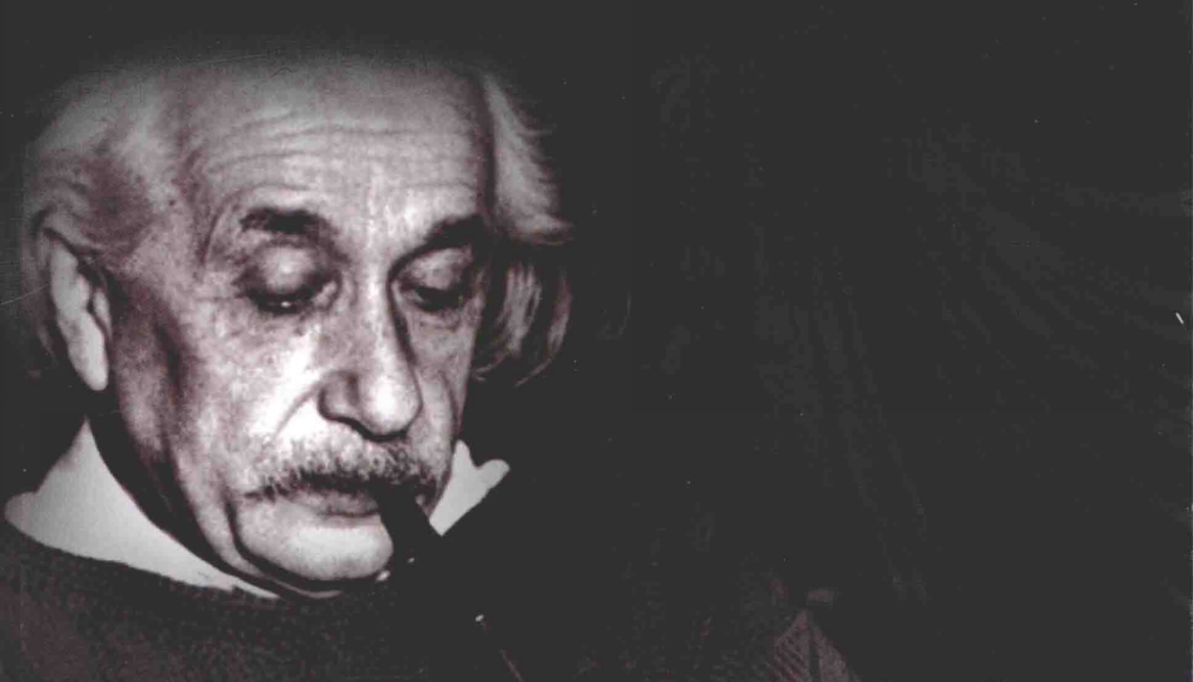


赵 峥◎著

Albert Einstein

爱因斯坦与相对论

——写在“广义相对论”创建100周年之际

引力与相对论、天体物理学专家
两届“中国图书奖”获得者赵峥教授
为纪念“广义相对论”创建100周年而作

上海教育出版社
SHANGHAI EDUCATIONAL PUBLISHING HOUSE

本书用中学生就能看懂的通俗语言，介绍狭义相对论与广义相对论的建立背景、创建经过、主要内容，及其对量子论和天体物理的重大贡献，勾勒出了经典物理学和现代物理学的建立脉络。

书中内容涉及人类对天体运行之谜的探索、万有引力的发现、相对论的创建、量子力学的建立，以及宇宙演化、引力波、黑洞、时空隧道与时间机器等诸多领域，并记述了牛顿、爱因斯坦以及霍金等著名科学家的曲折人生和成才之路，希望对那些渴望不虚度此生、渴望做出科学成就的年青人能有所启发。

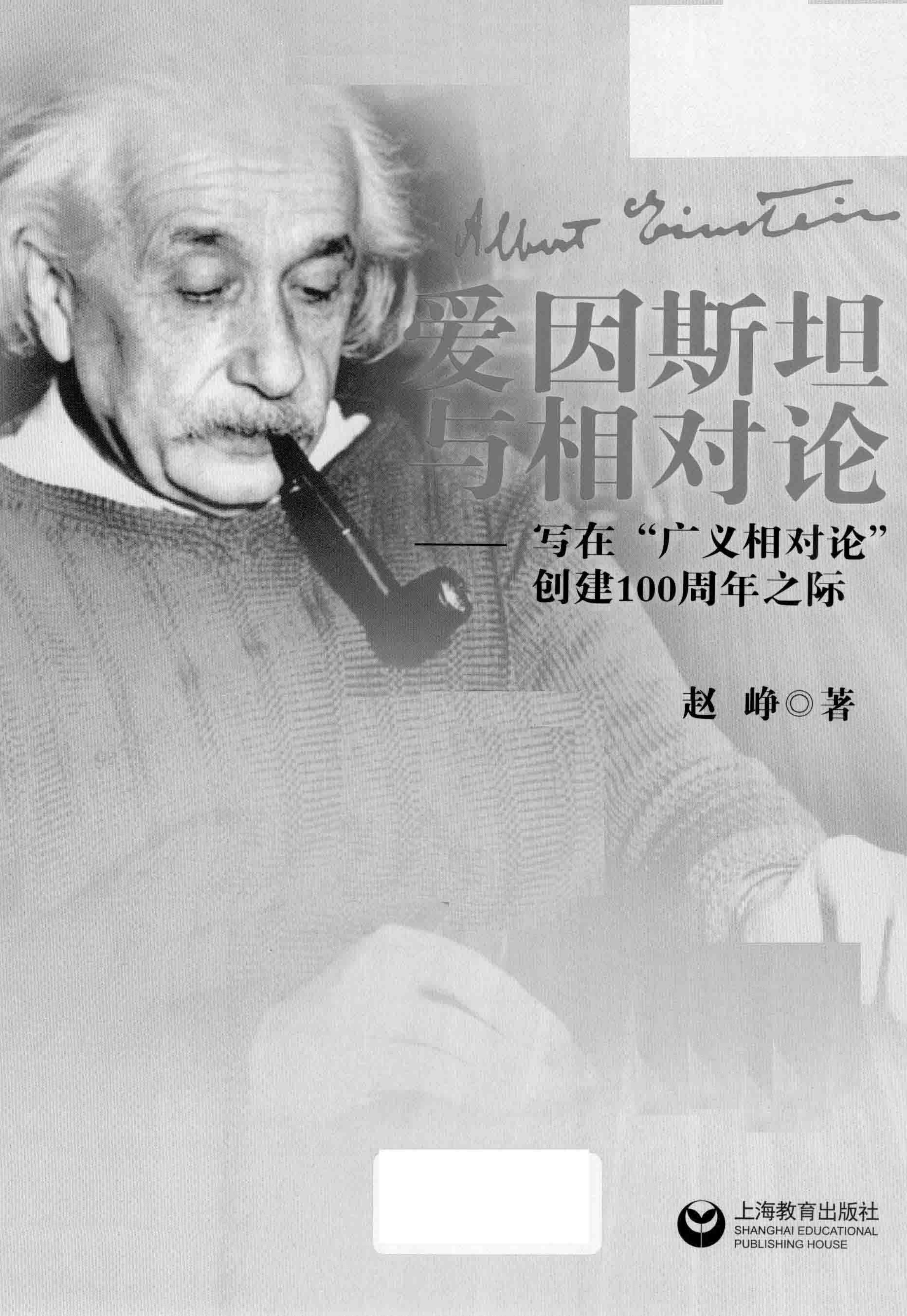
世纪出版

ISBN 978-7-5444-6336-2

9 787544 463362 >

易文网：www.ewen.co

定　价：　35.00 元



爱因斯坦与相对论

——写在“广义相对论”创建100周年之际

赵 峥◎著

上海教育出版社
SHANGHAI EDUCATIONAL PUBLISHING HOUSE

图书在版编目(CIP)数据
爱因斯坦与相对论：写在“广义相对论”创建100周年之际 / 赵峥著. —上海：上海教育出版社，2015.7
ISBN 978-7-5444-6336-2

Ⅰ.①爱… Ⅱ.①赵… Ⅲ.①物理学—普及读物 Ⅳ.①04-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第148643号

责任编辑 隋淑光 严 岷
装帧设计 王 捷

爱因斯坦与相对论
——写在“广义相对论”创建100周年之际
赵 峥 著

出　版 上海世纪出版股份有限公司
上 海 教 育 出 版 社
易文网 www.ewen.co
地　址 上海市永福路123号
邮　编 200031
发　行 上海世纪出版股份有限公司发行中心
印　刷 启东市人民印刷有限公司
开　本 700×1000 1/16 印张 15.5 插页 2
版　次 2015年7月第1版
印　次 2015年7月第1次印刷
书　号 ISBN 978-7-5444-6336-2/N·0005
定　价 35.00元

序　言

2015 年是广义相对论创建 100 周年，也是狭义相对论创建 110 周年。爱因斯坦认为，广义相对论的创建，是自己一生最重大的成就。他曾经自豪地说："狭义相对论如果我不发现，五年之内就会有人发现。广义相对论如果我不发现，五十年之内也不会有人发现。"

本书用中学生能看懂的通俗语言，介绍了狭义相对论与广义相对论的建立背景、创建经过、主要内容，及其对量子论和天体物理的重大贡献。内容涉及宇宙演化、引力波、黑洞等诸多方面。还对一些易于产生误解的问题作了明确解答，例如非欧几何是怎么回事，如何理解时空弯曲，"双生子佯谬"是否真实，遥远星系的红移为什么不是多普勒效应，宇宙膨胀为什么没有中心，时间为什么可能有一个开始，还可能有一个结束，等等。

爱因斯坦的广义相对论，可以看作狭义相对论的发展，也可以看作万有引力定律的发展。

人类历史上两位最伟大的物理学家——牛顿和爱因斯坦，都对万有引力的研究作出了重大贡献。牛顿发现了万有引力定律，理清了太阳系内复杂的天体运动；爱因斯坦则认识到万有引力不是一般的力，而是一种几何效应，是时空弯曲的表现，并尝试用广义相对论，对整个宇宙的演化进行科学的描述，促成了人类思想认识上的巨大变革。

本书真实地记述了牛顿、爱因斯坦以及霍金等著名科学家的曲折人生和成才之路，希望对那些渴望不虚度此生，渴望作出科学成就的年青人能有所启发。

作者所在的团队，在创新性教改的工作中，曾与上海教育出版社有过良

好的合作，这也正是催生本书的原因之一。在此谨向所有曾给予帮助和支持的上教社工作人员表示衷心的谢意，并对为本书出版付出辛勤工作的贾立群社长、方鸿辉编审，以及责任编辑隋淑光、严岷两位同志致谢。

作者的科研、教学与写作工作，长期得到国家自然科学基金（如10373003，10773002等）和教育部“精品视频公开课”经费，以及北京师范大学教学经费的支持。北京师范大学物理系张明建、项宇轩、蓝善权等研究生曾帮助录入文字及整理书稿，在此一并表示感谢。

赵　峥
2015年4月15日于北京

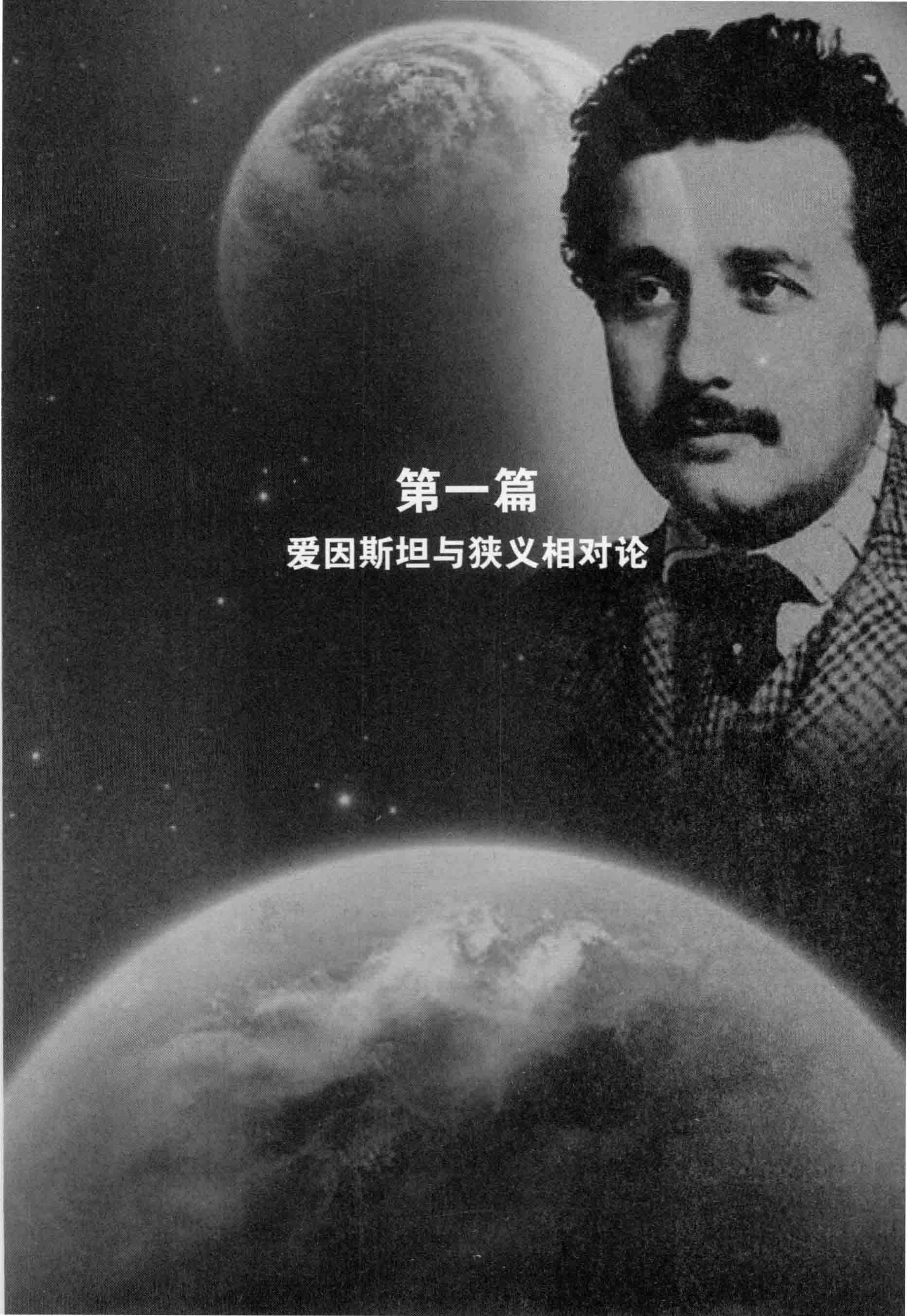
目　录





第一篇

爱因斯坦与狭义相对论





第一章　并非神童的伟人

1. 谁是最伟大的科学家

如果问年青人一个问题,“谁是最伟大的科学家?”大多数人一定会回答:“爱因斯坦”。

如果100年前有人问这个问题,大多数人的答案是:“牛顿”。

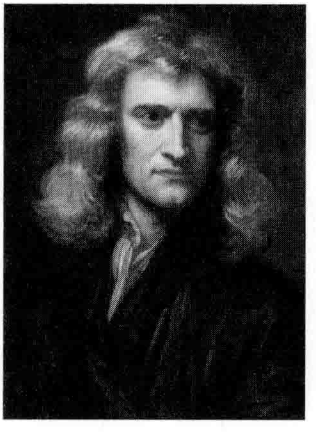


图1-1　牛顿

大约80年前,有人还问了一个怪问题,“谁是第二伟大的物理学家?”提问者言外之意是,第一伟大的物理学家毫无疑问是牛顿,只是第二伟大的物理学家尚无法肯定。有人认为第二伟大的是相对论的创建者爱因斯坦,也有人认为是量子论的创建者玻尔。

随着岁月的流逝,人们逐渐取得了一致意见:爱因斯坦的成就远高于玻尔,因为爱因斯坦是相对论的唯一缔造者,而量子论则是许多科学家的共同成就。玻尔只是其中一位重要的开拓者,他



图1-2　爱因斯坦

的主要成就就是建立了经典物理学和量子物理学之间的一个过渡理论:轨道量子化。这一理论经泡利、玻恩、海森伯、薛定谔、狄拉克等的努力,才成为成熟的量子理论。此后,又经过许多人的努力才发展成今天的规范场论,包括弱电统一理论、量子色动力学,以及大统一、超统一等理论。当然,玻尔也是极其伟大的,他的“轨道量子化思想”是一种开创性的新思维,大大解放了研究者的思想,极大地影响、启发和引导了后来的年青人。

一位科学家的历史地位和一项科学成就的重要性一样,需要经历时间的检验,由后人来评价和判断。

今天,我们已经看清楚,爱因斯坦不只是第二伟大的物理学家,他应该与牛顿并列第一,是与牛顿并列第一的物理学家。由于物理学是成熟最早的一门自然科学,而且是21世纪之前成就最大,也最重要的一门自然科学,所以,牛顿和爱因斯坦不仅是最伟大的物理学家,也是最伟大的科学家。

牛顿集17世纪之前的物理学成就之大成,构建起经典物理学的精密大厦。他的《自然哲学之数学原理》一书不仅包罗当时力学研究的全部成就,清楚地给出了力学三定律和万有引力定律,而且将力学理论通过严密的数理逻辑,建立在哲学思维和科学实验的基础之上,形成完备的体系,为物理学甚至整个自然科学的发展,树立了榜样,建立了楷模。

爱因斯坦则突破了经典物理学的框架,独自创建了狭义相对论和广义相对论,建立起更为宏伟的现代物理大厦,大大地改变了人类的时空观、物理思想和哲学思想。爱因斯坦的理论极其深奥难懂,因而他完成的思想突破和科学突破要比牛顿更为艰难。

总之,牛顿和爱因斯坦是人类历史上,迄今为止最伟大的两位科学家。不过,他们都不是神童,在童年和少年时代,都没有显示出值得称道的特殊

才华。

2. 牛顿的不幸童年

1642 年是物理学上重要的一年。这一年的 1 月 8 日，伽利略去世，圣诞节的晚上，牛顿出生。当然，这两件事是否发生在同一年，在学术界有一些争论。这是因为当时意大利和英国采用不同的历法。恺撒时代创立的儒略历（儒略即恺撒的名字），从公元前 46 年开始实行，到 16 世纪的时候已使用了一千多年，这时的历法与天文观测已差了十天左右。教皇格里高利集中了一些天文学家对历法进行订正，建立了新历法，纠正了这十天的偏差。这种新历法就是现在全世界普遍采用的历法——格里高利历。伽利略逝世时，意大利已使用新历，但不受罗马教会控制的英国，仍然使用旧历法——儒略历。若按新历，牛顿出生在 1643 年的 1 月 4 日。但按照儒略历，牛顿则出生在 1642 年 12 月 25 日的凌晨。考虑到当时的英国人，包括牛顿的母亲，都认为这个小宝贝出生在圣诞节的晚上，所以多数人还是觉得，把伽利略逝世和牛顿出生两件事说成发生在同一年更好一些，更容易记忆，也更具有戏剧性。

牛顿是遗腹子，他出生前父亲就去世了。

牛顿的父系家族成员基本上都没有文化。他的父亲是一位农民，家境贫寒，没有文化，而且爱饮酒，不过智力还可以。他的母亲有一点文化，但受教育程度也不高。牛顿出生后不久，母亲就改嫁给了一位年老的牧师。这位神职人员应该是一位思想道德工作者，但本人的道德却不太高尚。他对继子牛顿不好，给童年牛顿的心灵造成了不小的创伤。这不仅影响了牛顿与他的关系，也影响了牛顿与同母异父的弟弟的关系，而且造成了牛顿成年后思想和性格的扭曲。

少年牛顿基本上是在外祖父母的照料下长大的。由于老年人精力、体力和财力都有限，牛顿小时候身体很不好，体弱多病。他是一个孤僻、腼腆



图1-3　牛顿的家乡

的孩子，不爱与人讲话，喜欢一个人玩耍，独自在家里制作或摆弄一些小玩意儿。他在学校里学习不行，体质也不行，几乎没有一样行的，少年牛顿对自己缺乏信心。这时发生了一个“突发事件”，班上的一个“小霸王”欺负他，踢了他肚子一脚，把小牛顿疼得捂着肚子打转转。在忍无可忍的情况下，他奋起反击，居然把那个“小霸王”打败了。这件事使牛顿信心大增，觉得自己还是行的。既然打架行，大概学习也能行。以后牛顿果然在各方面都奋起直追，居然成了学校里的好学生。看来，“小霸王”这一脚踢得很重要，改变了牛顿的一生，对物理学也产生了影响。

但好景不长，牛顿10岁时继父又去世了。这时牛顿的家庭已不像以前那样贫穷，继父比较有钱，给牛顿母亲和几个弟妹留下了一些财富，包括一座庄园。庄园里有个小藏书室，里面有神学、文学、历史、法律、数学和机械等方面的书籍，还有一些简单的工具。牛顿经常去那里看书，制作和摆弄小玩具。

牛顿17岁时，母亲带着弟弟妹妹在家里忙不过来，就让牛顿退学回家干农活儿。但牛顿不大会干农活儿，也不大负责任，放羊时，他也随身带着书看。有几次他没有看住自己家的羊，把别人家的麦子吃了，闹得邻里间很不愉快。

倒是牛顿的舅舅比较有见识，觉得这个外甥虽然干农活儿不行，学习却表现不错，也许将来会有出息，就说服自己的姐姐（牛顿的母亲），让他继续读书。

3. 成功的阶梯——幸遇恩师

牛顿以优异的成绩从中学毕业，舅舅希望他能够上大学。当时的英国已经完成了资产阶级革命，上大学不再是贵族子弟的特权，平民子弟也有了上大学的可能。

牛顿的家庭此时已不算穷，母亲从继父那里继承了一些遗产，应该能交得起不算太高的学费。但牛顿的母亲是个守财奴，不愿为儿子掏这份钱。于是牛顿的舅舅又出面活动，为他争取到了剑桥大学的减费生名额。不过，学校不能白给这笔补助费，牛顿必须干一些勤工助学的活，例如当老师的实验助手，打扫公共卫生，帮有钱的同学购买生活、学习用品，甚至倒尿盆。贫穷和艰难的生活，使牛顿更加珍惜学习机会。他常在开学前的假期中，预先自学书本的内容，这大大提高了学习效果。实验助手的工作，也使他学到了更多的知识和技能。一位好心的教师喜爱这位贫穷而勤奋的学生，向牛顿敞开了自己的小图书室。那里的1800多本藏书大大开阔了他的眼界。牛顿在奋发图强中度过了自己的大学岁月。

剑桥大学是从牛津大学分出来的。牛津大学虽然实力雄厚，但比较保守。一部分比较倾向自由的老师和学生，离开牛津，在剑桥建起了这座新型的大学。剑桥大学虽然比较自由开放，但和牛津一样，主要开设文科，几乎没有理科。后来有一位叫卢卡斯的有钱人捐了一笔钱，在剑桥设立了一个"卢卡斯数学讲席"，规定担任这一讲席主讲教授的人必须是研究数学或其他理科的人。第一任卢卡斯讲席教授是牛顿的老师巴罗。

巴罗是一位有真才实学的人，在他的指导下，牛顿学习了笛卡尔、开普勒、伽利略等大师的著作，还学习了英国物理学家胡克等人的书籍，基本上

掌握了数学、力学、光学的基本知识和前沿领域。正是巴罗，把牛顿引上了科学研究的成功之路。

历史资料表明，巴罗对牛顿物理学思想的形成影响巨大，牛顿对于时间、空间和运动的许多观点直接来自巴罗。在牛顿的巨著《自然哲学之数学原理》中，不难发现巴罗的影子。

4. 牛顿的丰收年

大学毕业时，牛顿拿到了学士学位，并留校工作。这时恰逢英国爆发鼠疫，学校不得不放假以避免鼠疫蔓延。23 岁的牛顿躲到母亲的庄园避难，他在那里度过了一年半的光阴(1665—1666 年)。这段空闲的时间给了牛顿自由思考的机会。他抓住这段时间研究、思考了很多东西，取得了许多重要成就。

按照牛顿自己的说法，他一生最重要的成就，如力学第一、第二定律，万有引力定律，色彩理论，关于微积分的思想，都是在这段时间里酝酿得出的。于是，历史上把牛顿在乡下庄园里躲避瘟疫的这一年半时间，称为牛顿的丰收年，当时他在 23 岁到 25 岁之间。

鼠疫过去后，牛顿回到剑桥大学工作。巴罗看到他才华横溢，远远超过自己，就主动让贤，把卢卡斯讲席教授的职位让给了牛顿，当时牛顿才 27 岁。

巴罗是牛顿的领路人和举荐者，帮助牛顿打好了数学、物理学和哲学的基础，又把牛顿引导到了自然科学研究的前沿。他又是一位伯乐式的人物，当他发现牛顿不是一名普通的好学生，而是一位旷世奇才时，就主动让贤，使牛顿的才华得以充分发挥。牛顿担任卢卡斯教授之后不久，又在 30 岁时成为了英国皇家学会的会员。

牛顿遇到巴罗是他一生中的幸事。可以说，如果不是巴罗的引导和举荐，牛顿不可能顺利成材，也很难获得重大的科学成就。

“牛顿的丰收年”使我们看到，宽松、空闲的时间和自由思考的环境，对于科学发现，特别是重大的科学发现，有多么重要。

5. 爱因斯坦的童年

1879 年,爱因斯坦出生于德国的一座小城乌尔姆,他的父母都是犹太人,父亲是一个小工厂主。

童年的爱因斯坦说话很晚,直到两三岁才开始说话,而且似乎在表达上有困难,常常要嘴嚅动一会儿才能发出声音。父母都担心他智力有问题,医生认为他发育迟缓。

爱因斯坦成人后回忆说,他小时候总是在开口前把想说的话在嘴边练习一下,组织好句子再说出来,因此显得有些吃力。他从小养成了这一习惯,成人后也没有全改过来。

小爱因斯坦喜欢独自玩耍,摆弄一些小玩具,对大人们的谈话往往不注意。他突然开口说的事情,经常与大人们正在谈论的东西没有关系。

童年的爱因斯坦有两个特点:一个是比较专心,能较长时间地集中注意力;另一个是好奇心强。有一次父亲给他带回一个小罗盘,这个"玩具"让他幼小的心灵感到震撼:不管怎么转动罗盘,磁针总保持指着同一个方向,似乎有一种看不见的力量在支配磁针,这太奇怪了。他想,磁针背后一定有什么东西,他反复摆弄罗盘,感到极大的好奇和兴奋。

爱因斯坦 6 岁开始上小学。由于他的犹太血统,敢于坚持己见甚至顶撞老师,以及沉默寡言的性格,老师和同学都不喜欢他。特别是那些与他同龄的不懂事的同学,常常对他表露出种族歧视的言行。老师们虽然不表露种族歧视,但也明显不喜欢他。

小爱因斯坦功课很好,但不是神童,没有表现出奇才。他对数学表现出比一般孩子更多的兴趣,成绩也更突出。这与他父母和叔叔的引导有关,他们常提前买一些高年级的课本给他看,并与他交流探讨,这使他很开心。

6. 启蒙者与启蒙读物

爱因斯坦9岁进入中学学习。10岁那年，家里出现了一位常客，那是一位学医的犹太大学生，叫塔尔梅。当时德国中产阶级以上的犹太家庭有一个习惯，往往会邀请一位家境贫寒的犹太大学生到家里度周末。塔尔梅受到爱因斯坦父母的邀请，每周六到爱因斯坦家吃午饭。

这位大学生很受小爱因斯坦的喜爱。平常不愿张口的爱因斯坦对塔尔梅表现出很高的热情，不停地与他交谈。塔尔梅注意到爱因斯坦的好奇心和求知欲，于是每次都会带一些图书给他看。小爱因斯坦对这些书爱不释手，特别是其中一套《自然科学通俗读物》，共21本，引起小爱因斯坦极大的兴趣。作者在书中多次谈论到光速问题，比如说，“令人吃惊的是，无论光源如何运动，实验结果都一样”“既然事实证明，每一种光的速度都精确相等，那么就应该说光速定律是一切自然规律中最普遍的定律”。从后来的情况看，这套丛书的作者对光速的反复议论，给小爱因斯坦留下了很深的印象。正是对光速问题的反复考虑，日后把爱因斯坦引向了相对论的创立之路。这套丛书海阔天空地谈到自然科学的方方面面，包括天文、地理、动植物、矿物、物理学和化学等，小爱因斯坦都深感兴趣。



图1-4 14岁时的爱因斯坦

除这套丛书外，塔尔梅还给小爱因斯坦带来过一本欧氏几何教科书。欧氏几何的严密逻辑和有趣结论也使小爱因斯坦兴奋不已。他用几个月的时间读完了这本书，不但不觉得枯燥，反而兴趣盎然，还去找了别的几何书看。

塔尔梅曾给爱因斯坦带去了哲学书。对于一般人都觉得难懂的康德的著作，小爱因斯坦也表现出很大的兴趣，并进而又去阅读休谟、马赫、斯宾诺莎等哲学家的书。他不仅边读边思考，还

特别愿意与别人交流。

有五年时间，塔尔梅是爱因斯坦家的常客。今天看来，塔尔梅的出现，课外书的广泛阅读，对小爱因斯坦的智力启蒙产生了重大作用。

7. 不受欢迎的学生

不过，小爱因斯坦在学校里并不受欢迎。他小时候曾有过一段宗教狂热时期，而不少自然科学丛书的阅读又使他对宗教产生了怀疑，甚至质疑《圣经》内容的真实性。爱因斯坦虽然在学校里说话不多，但有时候还是会向老师提问。不过他通常问的不是课堂上学到的东西，而是从课外书中看到的东西，以及他对宗教的疑问，这使老师们很恼火。当时，德国军国主义盛行，老师要求学生绝对服从自己，并在学生面前竭力摆出一副无所不知的权威模样。由于爱因斯坦问的不是课本上的东西，老师往往答不上来。这使老师们感到尴尬，觉得有损尊严，心里很不高兴。特别是他竟敢怀疑《圣经》，怀疑上帝的存在！而且，爱因斯坦有坚持己见的性格，这使老师们越发觉得难以容忍。有的老师甚至有点神经过敏，觉得上课时坐在后排的小爱因斯坦注视自己的眼神，似乎总是带有嘲弄的成分，于是直接对他说："在课堂上看到你，我就不舒服。"

后来，爱因斯坦父亲的工厂经营得不好，就举家迁往意大利，投靠爱因斯坦家族的一些亲戚。但他父亲觉得当时的德国比意大利先进，希望他在德国接受完中学教育，就把小爱因斯坦独自一人留在慕尼黑，由他的一个远房亲戚照料。

在学校里，爱因斯坦的学习成绩虽不算特别突出，但还是不错的。特别是他自学了不少数学知识，经常超前学习几何知识，而且在中学阶段就已经掌握了微积分。

不过，他的犹太血统、无神论信仰、沉默寡言又坚持己见的性格，让老师们觉得他的存在有损学校的声誉。一些老师认为他毫无发展前途，将来干

什么都不会有出息。爱因斯坦也觉得在这所学校里越来越不舒服。于是，他想离校一段时间，散散心。他求助于一位经常给他家看病的医生，这位医生是老朋友塔尔梅的哥哥。爱因斯坦请他开了一张神经衰弱的证明，打算休学半年，缓解一下压力。但他还没有把证明交上去，校方就已经等不及了。老师告诉他，校长找他。校长建议他退学。退学？这怎么跟父母交代？仔细一想，这样也好，如果是休学，以后还得回来，退学就不用再回到这所讨厌的学校了。于是，15 岁的爱因斯坦“愉快地”接受了校方的建议，退学去了意大利，回到了自己父母的身边，结束了他在慕尼黑并不愉快的中学生活。

8. 阿劳中学——创新的摇篮

第二年，爱因斯坦准备考大学。他不会意大利语，又不喜欢德国的军国主义气氛，于是决定去报考位于瑞士德语区的苏黎世工业大学。瑞士分为德语区和法语区，德语区完全讲德语，与德国差不多，但没有军国主义气氛。

第一次，他没有考上，原因是中学的课程没有学完。虽然他数学很好，但其他课程尚未达到中学毕业的水平。该校物理系的教授韦伯看他喜欢物理，而且比一般考生要小两岁，就鼓励他补习一下，明年再来。该校的校长也很开明，表示他只要拿到中学的毕业文凭，就可以不再参加大学的入学考试，学校肯定会接受他。

于是，爱因斯坦就进了瑞士的一所州立中学——阿劳中学，在那里补习了一年。瑞士的教育风格与德国大不相同。瑞士的老师平等地对待学生，和他们自由地讨论问题，并在讨论中启发、鼓励他们。学校不仅给了学生学习的自由，也给了他们生活上的自由，还经常组织一些课外活动。爱因斯坦在那里度过了愉快的一年，还利用学习的空闲，思考了许多问题，其中就有他一直在苦苦思索的有关光速的问题。

那时候已经知道了光是波动，而且是电磁波。小爱因斯坦想，假如一个人能跑得与光一样快，他会看见什么呢？他想，应该看到一个不随时间变化



图 1-5　在阿劳中学时与同学合影(前左一为爱因斯坦)

的波场。但是似乎谁也没有见过这样的波场,这是为什么呢?

他又想,如果一个人在飞奔,用手在前方拿着一面镜子,当他的飞奔速度达到光速 c 时,他还能看见自己在镜中的像吗?要知道,镜子也在以光速 c 飞奔,这个人的脸发出的光能够到达镜子吗?如果脸发出的光相对于地面的速度是 c,镜子奔跑的速度也是 c,那么脸发出的光就不可能到达镜子,也就不可能被镜子反射,这个人就不可能从镜中看到自己的像。平时脸发出的光相对于脸的速度是 c,光能够到达镜子并反射回来,人就能在镜中看见自己的像。上述飞奔者要从镜中看到自己的像,其脸发出的光相对于地面的速度似乎应该是 $2c$,可是谁也没有见过以 $2c$ 运动的光。这是怎么回事?

没有任何人见过相对于自己静止的波场,也没有任何人见过高于 c 或低于 c 的光速,光似乎相对于任何人(不管他的运动速度是多少)都会以相同的速度运动,更不可能静止,这是为什么?爱因斯坦百思不得其解。此后,这个问题不时出现在爱因斯坦脑海中,并最终把他的思想引向了相对论。

爱因斯坦一生对学校教育都没有好印象,只对阿劳中学的补习班大加赞扬,他后来说:“这所学校用它的自由精神和那些毫不依赖外部权威的教师的淳朴热情,培养了我的独立精神和创造精神,正是阿劳中学成为了孕育相对论的土壤。”

9. 自主的大学生涯

第二年，16 岁的爱因斯坦拿到了阿劳中学的毕业文凭，如愿以偿地进入了苏黎世工业大学的师范系学习。这是一个培养大学和中学的数学、物理教师的系。全班共 5 名学生，只有一位女同学，叫米列娃·玛里奇，是位塞尔维亚姑娘。

他们的数学教授是闵可夫斯基。闵可夫斯基小时候与大数学家希尔伯特是同学。闵可夫斯基兄弟几位都称得上神童，聪明得让小希尔伯特几乎对自己失去了信心。不过，后来希尔伯特成了当时世界上最有成就的数学大师(这样的大师当时恐怕只有两位，另一位是法国的庞加莱)，而闵可夫斯基虽然也当了教授，但成绩平平。

他们的物理教授是韦伯(不是姓名被用作磁学单位的那位韦伯)，他是一位电工专家，兴趣在物理学的技术应用方面。他最初很喜欢爱因斯坦，因为爱因斯坦年龄小，聪明，又喜欢物理学。在爱因斯坦上一年考苏黎世工业大学未被录取时，他曾鼓励爱因斯坦不要放弃，补习一下中学课程，第二年再来。而且，他还建议爱因斯坦入大学前如果有空闲，可以来旁听他的课。

刚开学时，爱因斯坦对韦伯的物理课很感兴趣，先后选了他的 15 门课，包括 10 门理论课和 5 门实验课。

然而，随着时间的推移，爱因斯坦对韦伯的课越来越失望，因为他讲的知识过于陈旧，连麦克斯韦的电磁理论都不讲，而且他强调的都是电工类知识，对爱因斯坦关心的光速、以太等理论问题毫无兴趣。两年后，爱因斯坦终于彻底失望，他不想再浪费时间，就干脆不去听韦伯的课了。他买了一些当时著名的物理学家——基尔霍夫、亥姆霍兹、赫兹、玻尔兹曼等的著述，躲在租住的小阁楼内独自看书。这使韦伯很恼火。韦伯曾多次与爱因斯坦交流，试图说服他不要在那些以太之类的虚无飘缈的问题上浪费时间，而应该把注意力集中在那些实用的、与工程技术有关的物理学问题上，但爱因斯坦

固执己见，不听韦伯的劝导。

在另一位教师的实验课上，爱因斯坦与老师发生了更严重的冲突。他不愿做老师安排的实验，想做自己设计的实验，结果多次发生冲突，最后老师给了他最低分——1分。为此，校长还专门申斥了爱因斯坦。后来，更糟糕的事情发生了，爱因斯坦在实验中不小心导致了爆炸，手还受了伤。

闵可夫斯基的数学课，爱因斯坦也不感兴趣，也不去听。闵可夫斯基戏称他为“懒狗”。

爱因斯坦躲进小阁楼不去听课了。但他也不是完全不去学校，一般下午放学后他就去了。去了以后，一是与同学一起喝喝咖啡，问问他们最近课上讲了什么，也谈谈自己的自学心得；二是到实验室去做自己想做的实验。国外大学的实验室全天开放，允许学生在课余时间自己去做实验。

爱因斯坦不去听课，考试怎么办呢？没有关系，他们班上唯一的那位女生米列娃跟他关系不错，帮他记课堂笔记。不过，米列娃功课一般，真到了考试的时候，仅靠米列娃的笔记是不够的。幸好，爱因斯坦还有一位好朋友，他的另一位同班同学格罗斯曼。格罗斯曼不仅功课好，对老师有礼貌，而且每天西装革履，皮鞋擦得锃亮，从任何方面看，都是一位标准的好学生。每到考试前夕，爱因斯坦就向格罗斯曼借笔记。当过学生的人都知道，笔记对于复习功课非常重要，一般说来，考试后有人来借笔记问题不大，但考试前有人来借，就很难答应了，因为自己也要复习呀！不过，格罗斯曼确实是好学生，而且很够朋友，每次爱因斯坦来借，他都慷慨答应。拿到格罗斯曼的笔记后，爱因斯坦突击一两周就去参加考试，幸运的是每次都及格了，虽然分数不太理想。事后，爱因斯坦经常向别人表示：“这门课简直太没有意思了。”

大学的头两年，爱因斯坦的成绩还不错，在二年级的一次期中考试中，他考了全班的最高分，几乎满分，成绩第二的是他的好友格罗斯曼。后来他由于基本不去听课，成绩就下来了。

做毕业论文时，爱因斯坦自己设计了一个方案，想测量以太的运动对光

速的影响。韦伯不同意他的论题,认为简直是天方夜谭,完全是徒劳。爱因斯坦又想测一下物质的导电系数与导热系数之间的关系,韦伯也不同意。这时他与韦伯的关系已到了水火不相容的地步。韦伯恼火他不听自己的课,也不听自己的多次劝导,还对自己毫无礼貌,居然有一次不称自己“韦伯教授”而称“韦伯先生”,简直太不像话了。韦伯一定要他做一个纯粹研究物质热导性质的实验,并要他和米列娃一起做,作为他们的毕业论文。他们只好勉强做了。结果爱因斯坦得了4.5分,米列娃得了4.0分,是班上的两个最低分。格罗斯曼成绩不错,得了5.5分,满分是6分。

毕业总成绩,爱因斯坦得了4.9分,全班第四,也就是倒数第二。不过还能拿到毕业文凭。米列娃总成绩4.0分,倒数第一,这个分数拿不到毕业文凭,米列娃必须第二年再考一次。

就这样,爱因斯坦度过了大学岁月。格罗斯曼和另一位同学被闵可夫斯基留下来当了数学助教。爱因斯坦想,大概韦伯会把自己留下来当物理助教,可是韦伯没有要他,也没有要他们班上别的同学,而是从工科系中留了两名学生当助教。

韦伯与西门子公司的老板是朋友。这位朋友愿意给苏黎世工业大学捐一大笔钱,建立一个现代化的电气研究所,条件是所长必须由韦伯教授担任。协议达成后,学校建起了这个设备先进的研究所,韦伯担任了所长。这时的韦伯确实非常需要人,但他对爱因斯坦的印象太坏了,无论如何都不愿要他。

除去爱因斯坦和米列娃之外,其他的同学都找到了工作。爱因斯坦沮丧极了。

10.四面碰壁的毕业生

毕业后的爱因斯坦不仅饱尝了求职的艰辛,恋爱和婚姻也碰到很大的麻烦。

大学期间，爱因斯坦和米列娃就坠入了爱河。他们的恋爱遭到了爱因斯坦父母的坚决反对，主要原因还不在于米列娃不是犹太人，爱因斯坦的父母并不反对自己的孩子与非犹太人通婚，爱因斯坦的妹夫就是日耳曼人。问题在于米列娃出身于被压迫民族（塞尔维亚人），而且比爱因斯坦大三岁，更重要的是她还身有残疾，先天性髋关节脱臼，走路有点瘸腿。

米列娃相貌平常，不算漂亮，但她热爱物理学，这在当时的女孩子中可以说是凤毛麟角。那时能上大学的女生少之又少，而且一般都学文科。但米列娃偏爱理科，而且喜欢难懂的物理学，是爱因斯坦班上唯一的女生。



图 1-6　爱因斯坦与米列娃

爱因斯坦是班上年龄最小的学生，在性格上，他与米列娃差异很大。爱因斯坦热情快乐，长于思考、想象，说话滔滔不绝；米列娃则沉静忧郁，但她热爱科学，喜欢爱因斯坦的理想和抱负，喜欢听他的议论，成为他的挚友和忠实听众。因为她懂数学与物理学，所以两人有共同的话题。她对爱因斯坦的各种想法会不时表达一些看法，还能逗他开心。相反的性格没有使他们远离，反而促进了两人的相互吸引。

爱因斯坦的母亲是一位十分强势的女人，当得知儿子与米列娃恋爱之后，她难过极了，不断地劝说和斥责儿子，还多次哭闹，试图让他断绝与米列娃的来往。没想到，爱因斯坦产生了逆反心理，父母越阻拦，他越坚定地要和米列娃结婚。于是，双方处于僵持状态。

当时爱因斯坦诸事不顺，他向许多大学发出了求职信，全都石沉大海。爱因斯坦想，这准是韦伯捣的鬼。当时欧洲的大学，每个系只有一位教授，那时大学不多，物理系更少，各校的教授们一般都相互认识，或者彼此听说过。爱因斯坦想，他向某所学校求职，该校的物理学教授肯定会征求韦伯的意见：“你的这位学生怎么样啊？”爱因斯坦想，韦伯一定不会讲自己的好话，

求职失败肯定与韦伯有关。不过,这只是爱因斯坦自己的想象,他并没有拿到任何证据。爱因斯坦四处发牢骚,有些话很可能会传到韦伯的耳朵里,那就对他更不利了。后来,米列娃在给自己女友的信中就曾说:"你要知道,我的丈夫有一张臭嘴!而且他还是个犹太人。"

看来,爱因斯坦和米列娃也逐渐意识到,求职连续受挫,除去韦伯"捣鬼"之外,还可能来自社会对犹太人的歧视。

为了让求职的教授回信方便,爱因斯坦还买了附有邮资已付的回执的明信片,希望至少能听到一点简单的回音,但依然没有消息。

爱因斯坦的第一篇论文(关于毛细管研究)正式发表后,他还在求职信中附上自己的论文,希望能使收信的教授有个好印象,但还是没有任何回音。

他曾写信向著名的化学物理学家奥斯特瓦尔德教授求职。他在信中对这位教授的工作大加赞扬,并附上了已发表的关于毛细现象的论文,说自己的这一工作正是在教授您的著作的启示下完成的。但依然没有回音。

他又给奥斯特瓦尔德写了一封信,谎称自己"十分抱歉,在上封信中可能忘记留下自己的收信地址"。希望这样做能引起教授的注意,但还是没有收到回信。

看到儿子如此无奈,爱因斯坦的父亲非常难过,于是背着儿子,拉下老脸,自己给奥斯特瓦尔德写了一封信,首先恭维教授先生是我儿子最敬佩的人,然后谈到儿子的才华、上进心、勤奋和对科学的热爱,最后请教授看在他做父亲的老脸上,能考虑一下给他儿子一个工作机会,"恳求您原谅我冒昧地给您写这样的信。"但是仍然没有回音。

有趣的是,9 年后,奥斯特瓦尔德成了第一个提名授予爱因斯坦诺贝尔奖的人。

然而,当时的爱因斯坦实在是求助无门。他甚至想到自己的好友贝索的舅舅在一所大学任职,恳请贝索让他的舅舅帮忙。并说,如果你不方便对舅舅开口,能不能把我带到你舅舅面前,我来求他。这位舅舅确实帮了忙,

在自己学校的物理学教授面前说了爱因斯坦的好话，但仍然没能帮他得到职位。

爱因斯坦当时给欧洲几乎所有大学的物理系都写了求职信，但全都渺无回音。爱因斯坦感叹地说，“上帝不仅创造了蠢驴，还给了它一张厚皮”。

前些年，瑞士的一所大学在整理档案材料时，翻出了当年爱因斯坦的一封求职信。他们还开了记者招待会，展示了这封信：“大家请看，这是当年爱因斯坦写给我们的求职信，当时我们没有要他！”

爱因斯坦不得不在小报上刊登广告，说自己可以教数学、物理、小提琴，一个小时多少钱。但是只来了一个叫索洛文的学哲学的学生，两人一谈十分投机，爱因斯坦也就不再要钱。二人成为了终身好友。

爱因斯坦的一位同学为他在另一座城市找到了一个为期 3 个月的中学代课教师的职位，爱因斯坦给这位同学写了一封感谢信，那真是感激涕零。从信的内容可以看出，爱因斯坦当时有多么困难！

爱因斯坦是苏黎世工业大学师范系当年毕业生中唯一没有找到工作的学生。米列娃则连毕业文凭也没有拿到，因为她第二次毕业考试，也是最后一次机会，仍然没能通过。

为了安慰女友，爱因斯坦曾向米列娃展示杂志社寄来的他的第一篇论文的清样，但米列娃依然愁容满面：“这有什么用？找不到工作就没有钱，没有钱咱们怎么结婚？”

11. 发明专利局——空闲、宽容的环境

爱因斯坦终于时来运转。父亲在临终前同意了儿子的婚事。父亲很爱儿子，看他如此不顺利，实在不忍心，终于在婚姻上迁就了他。犹太人和过去的中国人很相似，父亲是一家之长，父亲同意了的事，母亲反对也就没有用了。

不久，爱因斯坦的好友格罗斯曼伸出了援手。格罗斯曼的父亲与伯尔

尼发明专利局(即瑞士联邦发明专利局)的局长是朋友。格罗斯曼对父亲讲:"你那位局长朋友不是总想找一些聪明人到他那里工作吗?你看我的同学爱因斯坦不就很聪明吗?"从现有的历史资料看,在爱因斯坦的众多老师和同学中,格罗斯曼是第一个看出爱因斯坦聪明的人。

格罗斯曼的父亲向局长先生介绍了爱因斯坦。局长让爱因斯坦去参加他们单位的招聘会。爱因斯坦想申请一个二等职员的位置。局长先生本人没有参加面试,但对面试的题作了有利于爱因斯坦的安排,不过面试的成绩还是不太理想。事后负责招聘的人向局长汇报,认为爱因斯坦不太适合在专利局工作,建议不予录取。局长先生为慎重起见,决定亲自与爱因斯坦面谈一次。局长对爱因斯坦的印象还可以,觉得他虽然不太熟悉技术工作,但小伙子足够聪明,于是决定给他一个三等职员的位置。

三等职员是最低等的职员,但毕竟是一名公务员,薪金也还可以,于是爱因斯坦进了专利局工作。有了固定薪酬,他马上与米列娃结了婚。不久之后,他们就相继有了两个儿子。



图1-7　1905年在专利局工作时的爱因斯坦

专利局通常接到专利申请后,先粗看一下,觉得比较好的就直接交给二等职员。觉得不太行的就给三等职员。三等职员仔细看一下,如果觉得还可以,就上呈给二等职员复审,如果觉得真的不行,就写个意见退回申请人。所以,爱因斯坦看到的专利申请一般都是不行的,不少是所谓发明永动机的报告。爱因斯坦耗费了一些时间,好在申请的专利不多,活儿不忙。而且,他觉得有些荒谬的发明,往往也含有一些聪明的想法,能活跃自己的思想,也曾受到一些启发,还挺有意思。

由于活儿不忙,爱因斯坦就可以思考自己感兴趣的问题。他把想看的书带到办公室,放在抽屉里。一看周围没有人,就拉开抽屉偷偷看。有几次

局长大人发现了他在上班时间看与本职工作无关的书，但也没有管他。局长先生很开明，觉得这个小伙子很聪明、很努力，那些书虽然与本职工作无关，也还是正经书，再说，也不影响本职工作，就随他去吧。

12. 自由探讨的俱乐部——奥林匹亚科学院

在专利局工作期间，从 1902 年开始，爱因斯坦与他的两个好友索洛文和哈比希特利用业余时间组织了一个自由读书、自由讨论的俱乐部，他们自己戏称为“奥林匹亚科学院”。索洛文就是爱因斯坦在小报上刊登家教广告后，唯一吸引来的一位年青人，在大学里学哲学，也学一点物理学。他与爱因斯坦谈得很投机，成为了好朋友。另一位谈得来的好朋友哈比希特是一位银行家的儿子，是学数学的。从 1902 年开始，三个人利用下班后的时间和假日，经常聚在一起自由读书、自由探讨。他们读的书包括哲学、物理学和数学等许多方面。他们读过哲学家休谟、斯宾诺莎等人的著作，读过数学家庞加莱与物理学家马赫等人的著作。这些介于哲学和自然科学之间的著作引起了他们极大的兴趣。特别是庞加莱的《科学与假设》和马赫的《力学史评》，对爱因斯坦产生了巨大影响。据索洛文和哈比希特后来回忆，他们读这些书时，往往一连几个星期兴奋不已。

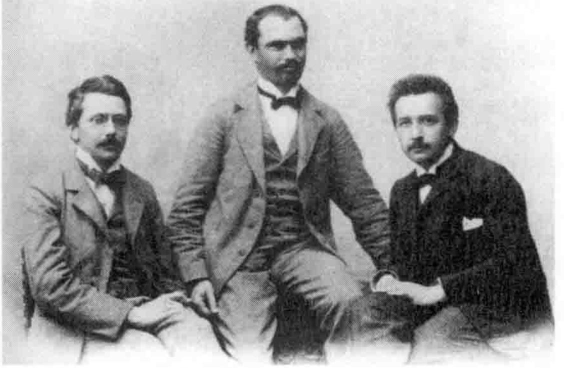


图 1－8　奥林匹亚科学院的三位成员：哈比希特（左）、索洛文（中）和爱因斯坦

除这三位主要成员外，后来又有一位叫沙旺的年青人加入了这个自由讨论的小组，他是学电气工程的，在邮电局工作，邮电局和专利局在同一座楼内办公。



图 1-9　贝索夫妇(安娜·温特勒·贝索与米歇勒·贝索)

1904 年，“奥林匹亚科学院”迎来了第五位成员——贝索。其实，爱因斯坦与贝索早就相识，那是 1896 年左右，在一次音乐会上。不过，贝索起先不在伯尔尼工作，1904 年他才来到伯尔尼，进入了发明专利局。爱因斯坦与贝索住得很近，两人经常一起上下班，在路上不断交流讨论。爱因斯坦从与贝索的讨论中得到过不少启发。贝索不仅是爱因斯坦的亲密朋友，而且还是他的亲戚。贝索夫人的弟弟，是爱因斯坦的妹夫。

爱因斯坦是“奥林匹亚科学院”中年龄最小的成员，但大家都认为他是“院长”，因为讨论的话题大都是他主导的。与这几位朋友的讨论，大大地活跃了爱因斯坦的思想，启发了他进一步思索，使他在走向相对论的路上，离成功越来越近。

“奥林匹亚科学院”对爱因斯坦的影响绝对不能低估。爱因斯坦成名后，许多记者向他探访，不少人问他小时候的情况，童年时有什么特殊才华和经历。爱因斯坦曾经答道：“你们怎么老问我小时候的情况，怎么不问问‘奥林匹亚科学院’对我的影响？”

从后来爱因斯坦与索洛文、哈比希特等人的通信也可以看出，爱因斯坦高度评价这个自由阅读、自由探讨的学习小组对自己的帮助。正是这个小组的活动，成就了爱因斯坦这位人类历史上最伟大的科学家，导致他后来作出如此多的重大发现。

通过“奥林匹亚科学院”对爱因斯坦的影响，可以看出有共同兴趣的人的自发聚会和自由探讨，在科学发现和人类进步中能起多么重要的作用！

第二章　乌云从何而来

1. 爱因斯坦的丰收年

爱因斯坦到专利局工作之前，就已开始发表论文。他在1901年发表了一篇研究毛细管现象的论文。1902年到专利局工作之后，他继续利用业余时间进行科学研究，题目都是他自己选择的。但论文数量不多，水平也比较一般。1902年发表了两篇，1903年一篇，1904年一篇。这种发表论文的速度，如果是在今天的中国，恐怕很难在高校中谋到一个职位。

1905年是爱因斯坦的丰收年，那年，他除去提交了博士论文(题目为“测定分子大小的新方法”)之外，还发表了其他四篇论文：6月份发表了解释光电效应的论文，提出光量子学说；7月份发表了用分子运动论解释布朗运动的论文，支持了分子的存在；9月份发表了题目为“论运动物体的电动力学”的论文，提出了狭义相对论，这是物理学史上一篇划时代的论文；11月发表了研究相对论的第二篇论文，提出了著名的质能关系式 $E=mc^2$。用今天的标准来看，这五篇论文中，除去那篇博士论文之外，其他四篇都是足以获得诺贝尔奖的重

要论文。

爱因斯坦生活的那个时代，物理学已经获得了巨大的发展，大量的实验成果和观测结果涌现出来，暴露出原有理论的许多矛盾，需要人们去解释。所以，那是一个呼唤伟人的时代，爱因斯坦的出现，可以说是时势造英雄！

然而，当时的大学毕业生有一大批，而且有那么多教授和科研人员，何以成功都集中在爱因斯坦一个人身上，只有这个处境不佳的小职员抓住了所有这些重大机遇？爱因斯坦创建了相对论，发展了量子论，可以说是现代物理学的总设计师，他的成就反过来掀起了一场物理学的革命，推动了物理学乃至整个自然科学甚至哲学的发展，演出了英雄造时势的精彩一幕。

机遇何以特别偏爱爱因斯坦？这个问题令后人深思，特别值得那些有抱负的年青人深思。

2. 两朵乌云

1900 年 4 月 27 日，德高望重的物理学家开尔文勋爵在英国皇家学会迎接新世纪的年会上致辞。他充满自信地讲道：“物理学的大厦已经建成，未来的物理学家只需要做些修修补补的工作就行了。只是明朗的天空中还有两朵乌云，一朵与黑体辐射有关，另一朵与迈克耳孙实验有关。”

然而不到一年，就从第一朵乌云里降生了量子论，1905 年又从第二朵乌云里降生了相对论。原来以为已经建成的宏伟的物理学大厦，在量子论和相对论开拓的辽阔天空中，显得只不过是一座小小的庙堂了。

开尔文为何会在前半句话中表达出如此强的自信呢？我们需要回顾一下 20 世纪之前物理学的发展。

真正的物理学从伽利略时代开始。伽利略把物理学看作一门实验的科学、测量的科学。他认识到，物理规律必须要用实验来验证，而且必须能够通过测量来定量地验证，否则这个规律就不应该被承认。脱离实验、脱离测量的论述，都不能列入物理学和自然科学的范畴。

牛顿总结了伽利略时代以来物理学的研究成果，发表了《自然哲学之数学原理》这本巨著，提出了力学三定律和万有引力定律，并把这些理论用严格的数学工具表述出来，同时把它们建立在严密的哲学思考和数理逻辑的基础之上，为整个物理学，乃至包括化学、生物学等在内的所有自然科学，树立了样板。

此后，热力学第一、第二定律被提了出来。人们不仅知道了能量守恒，知道了各种形式的能量（动能、势能、热能、电磁能等）可以定量地相互转换，而且知道了不可能从单一热源吸热做功，而不对外界产生任何影响，还知道了热量只能自发地从高温物体流向低温物体，若要使热量从低温物体流向高温物体，则必须有外界做功。人们终于认识到，第一类永动机（违背热力学第一定律）和第二类永动机（违背热力学第二定律）都是不可能制造出来的。开尔文的绝对温标也提了出来，科学界知道了自然界存在一个最低温度——绝对零度（零下 273 摄氏度）。

电磁学方面，在库仑定律、安培定律、法拉第的电磁感应定律等实验定律的基础上，麦克斯韦提出了完整的电磁理论，这一理论至今表明都是严格正确的。其缺点是麦克斯韦把电磁现象的本质误认为是介质的弹性行为。现在我们知道电磁现象与介质的力学性质毫无关系，完全是独立于力学之外的另一类物理性质。

光的本质在经过波动说和微粒说的反复斗争之后，由于托马斯·杨发现双缝干涉实验，波动说最终战胜了微粒说。大家终于一致认识到光是波动，而且是横波。当时的学术界认为光是以太的弹性振动。麦克斯韦的电磁理论出现后，人们又认识到光波本质上是电磁场的波动——电磁波，但还是认为它是以太的弹性振动。

由于在力学、热学、电磁学、光学方面的巨大成功，物理学家们充满了自豪，他们认为物理学的基本规律都已清楚，所以开尔文才在展望新世纪的演讲中表现出充分的自信。

下面我们再来详细回顾一下与两朵乌云有关的物理学进展，正是这些

进展,为相对论和量子论的诞生做好了铺垫。

3. 惯性定律的发现与再发现

伽利略做了大量实验,得出了许多规律,比较重要的是“惯性定律”“相对性原理”和“自由落体定律”。

古希腊时期就有人认识到了惯性定律。希腊人认为所有的物质都是由原子组成的。公元前400多年,德谟克利特等人曾经说过:“虚空中运动的原子,由于没有阻力,将一直等速运动下去。”

然而,此后不久,他们的正确论述被伟大的思想家亚里士多德搞乱了。亚里士多德是著名哲学家柏拉图的学生。柏拉图构建起一座雄伟的哲学大厦,是人类历史上最伟大的哲学家之一。然而,柏拉图是一位唯心主义的哲学家,认为人们看到的万事万物都不是真实的东西,真实存在的是一个抽象的叫作“理念”的东西。理念完美而永恒,但人们看不到它。人们看到的万事万物都不过是理念的影子。亚里士多德是柏拉图最优秀的学生,但他是一位唯物论者。他认为只有看得见、摸得着的东西才是真实存在的。“理念”谁也没有见过,因此他认为根本不存在“理念”,人们能够看见的万事万物才是真实的东西。他把老师的理论颠倒了过来。为此,年迈的柏拉图十分难过,他说,“我就像一匹老马,可小马驹还忍心踢我。”亚里士多德回答道,“吾爱吾师,吾尤爱真理”。

亚里士多德把柏拉图的哲学理论推进了一大步,开辟了一片辽阔的新天地。他强调世界的客观存在,强调观察,认为只有观测到的东西才是真实的。应该说这是人类思想史上的一大进步。

不过,亚里士多德有时观察得不够仔细,反而得出一些错误的结论。他看到在地面上运动的物体,如果没有人推,就会慢慢停下来。他没有认识到这是摩擦阻力造成的,错误地以为“力是维持物体运动的原因”,如果不一直有力推动,运动物体就会慢慢停下来。这就使德谟克利特等先贤关于惯性

定律的论述,笼罩在一片迷雾之中。

伽利略对物理学的一个重要贡献,就是拨开了这层迷雾。他经过仔细的实验观察,重新确认了惯性定律。

伽利略主要是从斜面实验出发来得到惯性定律的。如图 2-1 所示,只要斜面足够光滑,从左边滚下的小球,就应该能爬上右边斜面的等高处。右边的斜面越放平,小球为了爬到相等的高度,就会滚得越远。伽利略想,如果把右边的斜面完全放平,小球就会永远等速地滚下去。由此,伽利略推论了惯性定律的正确性。

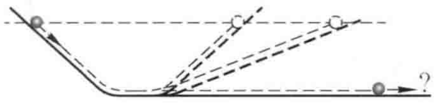


图 2-1 从斜面运动得出惯性定律

4. 相对性原理——从经验到科学

伽利略的另一个重要贡献是:他首先用科学的语言论述了“相对性原理”。

人类历史上早就认识到运动的相对性,各个民族的祖先都有一些这方面的论述。我国汉朝的一部著作《尚书纬》的“考灵曜”篇中就曾说过:“地恒动而人不知,譬如闭舟而行不觉舟之运也。”对于这段话,不同的古籍中有不同的记载,但大同小异。这是由于《尚书纬》早已失传,人们只能转载古代学者对此话的引述,不同学者的引述有一些差异,但基本意思相同。

宋朝的陈与义有一首诗,很优美地描述了运动的相对性原理:

飞花两岸照船红,

百里榆堤半日风。

卧看满天云不动,

不知云与我俱东。

陈与义生于北宋,死于南宋时期,他曾先后任吏部侍郎(相当于现在的中央组织部副部长)和参知政事(副宰相)。他经历了我国历史上一段悲惨

动荡的时期，有不少优秀的作品保存至今。

不过，上面这些议论，都仅仅是人们长期生活经验的总结，并未上升到“物理规律”的层面。第一个用科学语言阐述“相对性原理”的人是伽利略。

他在《关于两大世界体系的对话》一书中，用理想实验来详细阐述自己的思想：

“塞尔维特斯(代表伽利略的观点)：……设想把你和你的朋友关在一只大船的舱板下最大的房间里，里面招来一些蚊子、苍蝇以及诸如此类有翅膀的小动物。再拿一只盛满水的大桶，里面放一些鱼；再把一只瓶子挂起来，让它可以一滴一滴地把水滴出来，滴入下面放着的另一只窄颈瓶子中。于是，船在静止不动时，我们看到这些有翅膀的小动物如何以同样的速度飞向房间各处；看到鱼如何毫无差别地向各个方向游动；又看到滴水如何全部落到下面所放的瓶子中。而当你把什么东西扔向你的朋友时，只要他和你的距离保持一定，你向某个方向扔时不必比向另一个方向要用更大的力。如果你在跳远，你向各个方向会跳得同样远。尽管看到这一切细节，但是没有人怀疑，如果船上情况不变，当船以任意速度运动时这一切应当照样发生。只要这运动是均匀的，不在任何方向发生摇摆，你不能辨别得出上述这一切结果有丝毫变化，也不能靠其中任何一个结果来推断船是在运动还是静止不动。这种等价关系产生的原因是，船的运动是船中一切事物也包括空气在内所共有的；我的意思是假定这些事物都被关在房间里……

塞格瑞得斯(聪明的外行)：虽然我在航海时从来没有想过要试验这些现象，可我相信它们会像你说的那样发生。为了证实这一点，我想起了我在船舱里经常不知道船究竟是在动还是静止不动；有时我猜想船是朝某个方向行驶，其实它朝另一个方向走。所以我承认并确信前面提出的所有证明相反说法的实验都毫无价值。”……

“相对性原理”的意思是说，所有的惯性系都是平等的。不能用任何实验来区分一个系统是静止还是在作匀速直线运动。这一原理是物理学最重要的基石之一。不管是经典力学，还是爱因斯坦的相对论都要用到它。

5. 自由落体定律——比萨斜塔上的实验是真的吗

伽利略的第三个重要贡献是得出了自由落体定律。一般人都听说过他在比萨斜塔(图 2－2)上做自由落体实验,从而得出这一定律的故事。然而,历史考证表明,这一优美动听的故事恐怕并不存在。研究表明,可能有人在比萨斜塔上做过这一实验,但肯定不是伽利略;伽利略也许在什么地方做过这一实验,但肯定不是在比萨斜塔上。比较可靠的是,有一些反对伽利略的人在比萨斜塔上做过这一实验,两个小球没有同时落地,于是观众爆发了一场争吵。伽利略本人虽然不在场,但人群中有伽利略的支持者在观看。他们强调实验者的双手没有同时伸开,两个小球不是同时开始下落的。事实上,我们今天知道,由于空气阻力的存在,即使两个球同时开始下落,它们也不会同时落地。



图 2－2　比萨斜塔

要精确做成这一实验,必须抽真空,让两个小球在真空中同时下落,而且不能用人的双手来操纵球,必须用精密的电子机械设备自动控制,才能保证两个球同时开始下落。后来的精密实验的确严格地证实了自由落体定律。

6. 斜面实验的“举一反三”

伽利略时代根本无法完成这一精确实验，那么他是怎么得到“自由落体定律”的呢？伽利略其实是通过哲学思考和斜面实验推论出这一定律的。如图 2-3 所示，一块光滑的斜木板，让不同重量和成分的小球(金球、铁球、木球)沿斜面下滚，伽利略发现它们下滚的加速度相同，与小球的物质成分和重量无关。如果把木板放得更垂直地面一些，则所有小球的下滚都加快，但仍然同时滚到地面。这说明下滚加速度虽然与斜面的倾角有关，但依然与小球的成分和重量无关。不管把斜面放成什么角度，小球的下滚加速度都与其成分和重量无关。伽利略想，如果把斜木板完全放垂直，下滚的小球不就成了自由落体吗？他认为斜面运动可以看作“减缓了”或者“冲淡了”的自由落体运动。也就是说，自由落体运动可以看作斜面运动的极限。于是，伽利略通过对斜面运动的研究，推论出了“自由落体定律”的存在。

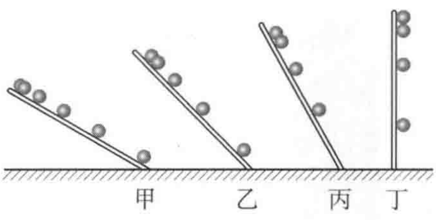


图 2-3　从斜面运动得到自由落体定律

在中学的物理学课本里，“自由落体定律”只是作为一个匀加速直线运动的例子出现。但是，近代物理学的研究表明，它有更深刻的含义。正是通过对自由落体的思考，爱因斯坦得出了著名的“等效原理”，并以此为台阶，打开了广义相对论的大门。所以，“自由落体定律”比一般人的了解要重要和深刻得多。

伽利略长时间反复研究斜面实验。这一实验成了他最熟悉的科研手段之一。他把这个实验运用到能够举一反三的地步。他在研究其他问题的时候，也往往自觉或不自觉地想到这个实验、利用这个实验。我们看到，他把斜面放平，得到了惯性定律；把斜面竖起来又得到了自由落体定律。

这个事例启示我们，研究任何一个领域的人，只要功夫下到了，达到熟

能生巧的地步，就有可能举一反三。用自己掌握的最熟悉的知识、手段和工具，不仅能够深入发掘本领域的宝藏，而且有可能敲开其他科研领域的大门。

7. 牛顿的“圣经”

从伽利略时代到牛顿大学毕业，物理学家已经积累了大量物理学知识，主要是力学方面的知识，其中不仅有伽利略的贡献，也有开普勒和其他人的贡献，特别是开普勒提出的行星运动三定律，为万有引力定律的发现作好了铺垫。

牛顿集前人研究之大成，完成了划时代的巨著——《自然哲学之数学原理》(图2-4)。这部著述包括对绝对空间和绝对时间的论述，包括质量和动量的定义，包括著名的力学三定律和万有引力定律。内中既包括对实验的论述，也包括深刻的哲学思考。由于当时微积分处于初创阶段，尚不够成熟，使用起来不太方便，牛顿在这本书中主要用几何学工具，书中绘有不少图。



图2-4 《自然哲学之数学原理》第一版

牛顿一开始就假定存在一个绝对空间和一个绝对时间。他写道：

“绝对空间，就其本性而言，与任何外部事物无关，它总是相同的和不可动的。相对空间是绝对空间的某个可动的部分或量度……”

“绝对的、真实的和数学的时间自身在流逝着，而且因其本性均匀地、与任何外部事物并不相关地流逝着，它又可以叫作延续性。相对的、表观的和普通的时间是延续性的一种可感知的、外部的(无论是准确的或不均匀的)借助运动来进行的量度，我们通常就用它来代替真实时间；例如一小时、一

个月、一年。"

如果与巴罗的著作相比较,人们不难看出上述论述中有着巴罗的影子。

《自然哲学之数学原理》概括了当时力学研究的全部成就,成为了经典物理学的《圣经》。英国诗人波普由衷地赞美牛顿的成就:

> 自然界和自然界的规律隐藏在黑暗中,
>
> 上帝说:"让牛顿去吧!"
>
> 于是一切成为光明。

8. 光是波还是粒子

最早对光的本质发表科学见解的人是笛卡尔、胡克和惠更斯。他们认为光是一种波动,是以太的弹性振动。惠更斯把这一认识发展成比较系统的科学理论——波动说。用波动说可以解释光的直线传播、折射、反射和双折射等许多光学现象,但不能说明为什么没有看到光有干涉现象发生。干涉是所有波(例如水波,图 2-5)的共同特点,为何唯独光看不到这种现象?另外,惠更斯认为光波是纵波,因此他的理论也不能解释光学中的偏振现象。

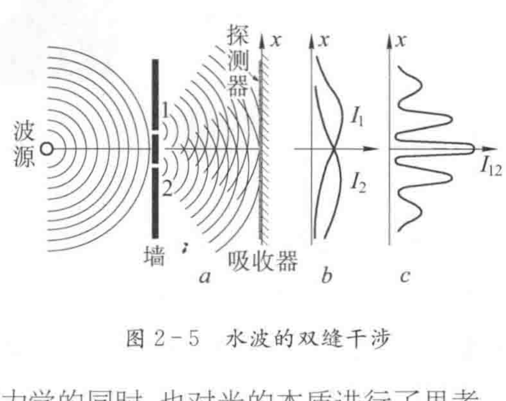


图 2-5　水波的双缝干涉

牛顿在研究力学的同时,也对光的本质进行了思考。他认为光不是波动,而是微粒,提出光的微粒说。他把自己的理论写成文章,投给英国皇家学会会报。学会的干事长胡克赞同光的波动说,他看了牛顿的文章后,认为

牛顿在胡说八道。光怎么可能是微粒呢？光是波动，这个问题已经清楚了。于是，他拒绝刊登牛顿的文章。牛顿一气之下，从此再也不给皇家学会会报投稿。所以，牛顿一生发表的论文很少，他的主要研究成果都刊登在他的两本巨著《自然哲学之数学原理》(45 岁时发表)和《光学》(65 岁时发表)中。当然，还有一些牛顿的短文流传于世，例如《论运动》等。不过这些文章实际上都取自牛顿与友人或同行的通信，而不是专门的科学论文。牛顿常常在信中长篇大论，议论自己的科学观点和成果，后人便把这些内容一段段截取下来，作为短文刊登出来。

刚开始，光的波动说稳如泰山。因为当时的牛顿毕竟还是个小人物，比不上已经名闻学术界的笛卡尔、惠更斯和胡克，所以牛顿的微粒说影响不大。知道牛顿观点的人不多，而且知道的人也不大相信。

有趣的是，牛顿在光学实验中观察到的“牛顿环”现象，实际上就是光的干涉现象，但牛顿没有认识到这一点，仍然用光的微粒说解释这一现象。波动说的拥护者也没有抓住这一点来反击微粒说。

后来，随着牛顿在力学研究上的巨大成功，他关于光学方面的观点也越来越被大家重视。大家想，牛顿这么伟大，他的力学理论这么完美，光学理论也肯定有道理；何况光的波动说无法说明为何看不到光的干涉现象，而微粒说没有这个困难，微粒流当然不会有干涉现象。

这样，光的微粒说就战胜了波动说。在光究竟是波还是粒子的争论中，微粒说赢得了第一个回合。

9. 皇家学会的由来

为了让大家清楚胡克当时在科学界的地位，我们简介一下英国皇家学会，这个对人类的科学发展作过重大贡献的学术组织是怎么成立的。

17 世纪的英国，是世界上工业、技术、文化最发达，经济也最富有的一个国家，有不少贵族和新兴资本家腰缠万贯。这些富人在有了充足的财富后，

开始有了更多的闲情逸致。

于是，一些达官贵人或贵夫人开始在家中举办“沙龙”活动（“沙龙”是法文“客厅”的意思），邀请各方面的名士及朋友在家中聚会，附庸风雅。

在众多的沙龙聚会中，有一个专门邀请科学界名流参加的“沙龙”，胡克等人都去参加，他们自称为“无形学院”。

多次活动后，大家觉得最好能成立一个比较正式的、得到官方承认的学术组织，这样可以扩大影响，经费来源也会不成问题。于是，他们去找英国国王，建议成立一个“皇家学会”。英王当即表示赞同成立这个冠以皇家名义的学术组织，但英王同时声明，他没有钱，经费还得你们自己去想办法。

皇家学会于 1660 年正式成立。不管怎样，总算有了一个以皇家名义冠名，得到国家正式认可的学术组织，虽然经费还得自己筹集。

学会的最高领导人是会长，但会长一般都是挂名的，主要的事情由干事长操作。胡克长期担任干事长，负责学会的实际工作和日常事务。所以，胡克也就长期是英国学术活动的推动者和学术界的实际领导者。他负责起草了学会的章程，为皇家学会的建设和发展付出了大量心血。

牛顿比胡克小六七岁，在胡克眼里他是“小字辈”，所以胡克对初出茅庐的牛顿很不客气。

10. 神童托马斯 · 杨——光是波，是横波

牛顿的微粒说统治了光学 100 多年。1801 年情况发生了逆转。那一年英国青年科学家托马斯 · 杨（Thomas Young）完成了双缝干涉实验，证实了光不是微粒而是波。他发展了惠更斯的波动理论，并进一步指出，光波与声波不同，声波是纵波，而光波是横波，从而解释了光的偏振现象。

托马斯 · 杨是历史上有名的神童与才子，2 岁就能读书，4 岁时将《圣经》通读了两遍。他 14 岁时已通晓拉丁、希腊、法、意、希伯来、波斯和阿拉伯等多种语言，还会演奏多种乐器。他在物理学、化学、生物学、医学、天文学、

哲学、语言、考古等领域都有贡献。托马斯·杨先当医生，研究视觉，发现了眼睛散光的原因，转而研究光学，完成了光的双缝干涉实验。他认识到光是横波，并提出了颜色的三色原理。此后，他又破译了埃及的拉希德石碑上的一些文字，对考古学作出了重大贡献。法国人商博良(另一位神童)在此基础上进一步努力，终于完全破译了碑上的文字，奠定了研究古埃及历史的文字学基础。

考虑到牛顿在学术界和英国人民心中的神圣地位，托马斯·杨在阐述自己的光学工作时小心翼翼，他说："尽管我仰慕牛顿的大名，但我并不因此非得认为他是百无一失的，我……遗憾地看到他也会弄错，而他的权威也许有时会阻碍科学的进步。"

尽管托马斯·杨是个有名的神童，而且他在挑战光的微粒说时小心谨慎，一再声明他对伟大牛顿的敬仰，但还是遭到了抨击。有人指责他的文章没有任何价值，他的实验根本称不上是实验，他的干涉理论"荒唐"而且"不合逻辑"。在一二十年间，托马斯·杨的工作没有人支持，他的论文很难发表。他不得不自费印了一些小册子来传播自己的成果，但仍几乎无人理睬。

毕竟物理学是一门实验科学、测量科学，事实胜于雄辩，经过十几年的努力，学术界终于承认了光的波动说，摒弃了伟大牛顿提出的微粒说。这样，在波动说与微粒说的斗争中，波动说赢得了第二个回合。

11. 麦克斯韦——光是电磁波

麦克斯韦的父亲知识渊博，兴趣广泛，多才多艺，他是一位律师，也是一位工程师和发明家，还是儿子的科学启蒙导师，对麦克斯韦的成长影响很大。

小麦克斯韦好奇心很强，问题多得不得了，而且经常坚持自己的看法，别人很难说服他。麦克斯韦的父亲对此很高兴，他知道，强烈的兴趣和求知欲，是孩子成才的最好动力。正如一位学者所说，"毅力、勤奋、入迷和忘我

的出发点，实际上在于兴趣。有了强烈的兴趣，自然会入迷，入了迷自然会勤奋，有毅力，最终达到忘我。”

在学校里，麦克斯韦孤僻而固执的性格，不为同学们所喜欢，有人给他起了个绰号叫“傻瓜”。然而，几年后在一次数学和诗歌比赛上，麦克斯韦一举拿了两个第一，大大出乎同学们的意料，从此再也没有任何人敢歧视他了。

麦克斯韦 19 岁进入剑桥大学学习，这是一所不断涌现科学明星的大学，牛顿和达尔文都毕业于此。他在学校里显出很高的数学、物理学才华，毕业后留校工作，致力于电磁学的研究。

29 岁时，麦克斯韦拿着自己的论文贸然登门拜访了年近七旬的法拉第，虚心向他求教。法拉第肯定他是真正理解了自己的电磁学说的人。法拉第鼓励他说：“你的论文是一篇出色的文章，但你不应局限于用数学来解释我的见解，而应该突破它。”

麦克斯韦大受鼓舞和启发，决心也要像牛顿那样，“站在巨人的肩上”去摘取新成果。不久之后，他就总结前人的众多成果，如库仑定律、安培定律、毕奥—萨发定律、电磁感应定律等，进一步把法拉第的电力线、磁力线思想，用严密的数学发展成一套完备的电磁方程组，即今天的麦克斯韦电磁理论。这一成果，使麦克斯韦成为当时继牛顿之后最伟大的物理学家。

这套理论不仅集原来的各种电磁定律之大成，成为一套完备的理论，而且还包含有原先不知的新成果，如“位移电流”等。

麦克斯韦的电磁理论在今天看来也完全正确。不过，有趣的是，麦克斯韦导出他的方程组的途径却是错误的。他把电磁现象看作介质的弹性和涡旋等的表现，从介质的力学性质导出了他的电磁方程组。今天我们知道，电磁现象和力学现象并不相关，两种性质是相互独立的，麦克斯韦的推导是错误的，但他的结论是正确的。

历史上曾多次发生类似的事情，一个正确的物理定律被人用错误的理论推导出来。最后人们发现，定律是正确的，推导是错误的。例如著名的卡

诺定理就是从热质说导出的。现在我们知道,根本不存在热质,有关推导是错误的,但卡诺定理是正确的。

为什么会出现这样的情况呢?这是因为:天才的,甚至不仅是天才的发现,都不是靠着逻辑推理得出的,而是发现者总结当时的大量实验结果后,思想产生飞跃,最终猜出来的。为了证明自己的猜测,他们就用当时最时髦的理论去推、去凑,以使同行们相信他们的结论是正确的。

然而,不管怎么说,麦克斯韦的理论是正确而伟大的。除去总结归纳了前人的成果外,麦克斯韦还提出了"电势"和"磁势"的概念。长期以来,人们认为只要用电场强度和磁场强度这两个概念,就足以描述电磁理论,"电势"和"磁势"可有可无,最多也就是在某些场合下用起来方便一些。不过,近年来规范场论的研究表明,"电势"和"磁势"还藏有"电磁场强"没有包含的重要信息。

另外,麦克斯韦发现电磁场变化的波动,即电磁波,是以光速传播的。他正确地认识到了光波就是电磁波,大大推动了光学的研究。

现在,人们看到了光波的本质。光不仅是"波动",而且本质上是一种电磁现象,是电磁波,从而进一步推进了光的波动说。

12. 两朵乌云均来自对光的认识

前面谈到的开尔文所言的两朵乌云,其实都与光的本性有关。光既然是波,就应该有一个载体,正如水波的载体是水,声波的载体是空气或其他介质一样。当时的学术界认为,光的载体是古希腊哲学家亚里士多德提出的以太。亚里士多德提出地心说(图 2-6),认为地球是宇宙的中心。太阳、月亮和行星等天体都镶在一个个透明的天球上,例如月亮镶在月亮天上,太阳镶在太阳天上,金星镶在金星天上……所有天球都围绕着地球转。离地球最近的天球是镶有月亮的月亮天。亚里士多德认为,宇宙分为两个世界,即月亮天以下的"月下世界"和月亮天以上的"月上世界"。他认为月下世界的万物都是由土、水、火、气四种元素组成的,这些物质是不高级的、变化的,是可以腐

朽、灭亡的。“月上世界”则是高级的、不变的、永恒的，充满轻而透明的以太。

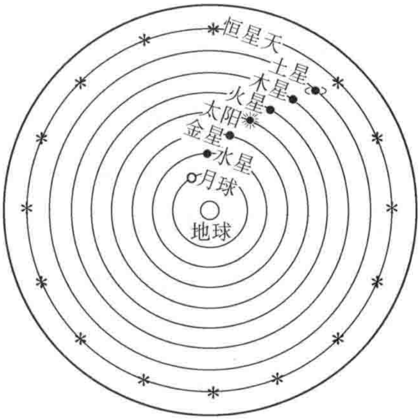


图2-6　亚里士多德的地心说

19世纪的科学家虽然不相信地心说，但继承了亚里士多德的“以太”观念，认为宇宙中充满了“以太”，这些以太不仅轻而透明，而且弹性极好，遥远恒星的光，正是作为以太的波动传到我们的眼睛来的。

那时的学者已普遍接受日心说，而且认识到恒星是遥远的太阳，地球肯定不是宇宙的中心。那么，以太相对于地球运动吗？直觉告诉我们，似乎地球相对于以太不应该静止。天文观测中的光行差现象也似乎告诉我们，地球在以太中穿行。迈克耳孙实验就是用来精确测量以太相对于地球的运动速度的。然而，检测的结果却是速度为零，以太似乎相对于地球静止。迈克耳孙实验与光行差现象的矛盾，构成了开尔文所说的第二朵乌云。这朵乌云最终导致了相对论的诞生。

第一朵乌云，则与光究竟是粒子还是波的问题有关，当时波动光学和电磁理论都表明光是波动，但是黑体辐射的问题却使人对光的波动说产生了怀疑。解释这一实验产生的困难，最终导致了光量子理论的诞生，使人们惊讶地看到光不是简单的、单纯的波动，光还具有粒子性。光既是波，同时又是粒子，这是怎么回事呢？

第三章　乌云引向的革命

1. 第一朵乌云——黑体辐射疑难

1870年，普法战争结束，法国战败，割地赔款，把阿尔萨斯和洛林两个省割让给德国。这对德国至关重要。这两个省靠着德国的鲁尔区，鲁尔区有煤矿却没有铁矿，这两个省正好有铁矿。当时的德国统治者是一批雄心勃勃的改革者，他们正试图把德国从一个以生产土豆为主的落后农业国，变成一个以生产钢铁为主的先进工业国。现在，德国不仅有煤矿，又有了铁矿，还得到一大笔战争赔款，实现工业化的目标已近在眼前，"万事俱备"，只欠提高科学技术这一"东风"了。

德国的工程技术人员和科学家，对炼钢问题进行了深入的研究。他们认识到提高钢铁质量的关键之一是控制炉温。

如何测量和控制钢水的温度呢？他们发明了通过钢水的热辐射来确定炉温的方法。在高炉或平炉上开一个小孔，他们发现从小孔射出的热辐射的能量分布会呈现为一条曲线，他们称其为黑体辐射曲线(图3-1)。当时已经知道热辐射是光波的一种，本质上是电磁波。也就是说，黑体辐射

的成分就是电磁波。

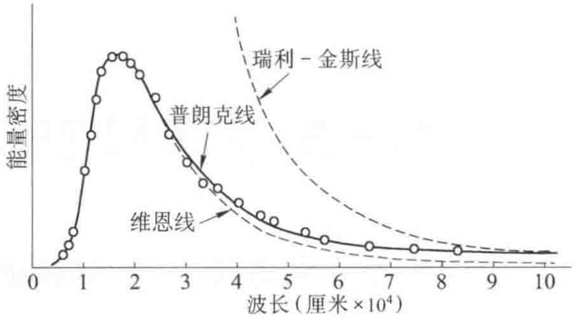


图 3 - 1　黑体辐射曲线

图 3 - 1 是条黑体辐射曲线，横坐标表示辐射的波长，左边波长短，呈现为蓝白色光，右边波长长，呈现为红色光。纵坐标表示辐射能的密度。科学家们发现这条曲线的“高矮胖瘦”的形状与温度有关，从对这些辐射曲线的描绘和测量，可以探知辐射的温度，它也就是钢水或铁水的温度。特别是德国科学家维恩，得到一个简单实用的公式：

$$\lambda_m T = \text{常数} \tag{3.1}$$

这一公式称为维恩位移律。式中 λ 是黑体辐射的波长，λ_m 表示黑体辐射曲线峰值(极大值)处的波长大小，T 表示辐射的温度。用这个公式，只要找到曲线的 λ_m，就可以准确地确定炉温 T。

令科学家困惑不解的是，黑体辐射的能量分布为什么会呈现为这种形状的曲线？于是，他们试图构造物理模型来加以说明。当时原子论已经被多数科学家接受，一般人认为物质的最小结构单元就是原子。物质发射和吸引辐射就是由一个个原子进行的。原子就像弹簧支配的谐振子，在不断地振动。吸收辐射，振动就加剧；放出辐射，振动就减弱。维恩按照这样的思路，构造了一个物质发射和吸收辐射的模型，并通过计算描出了一条热辐射曲线，即图中的维恩线。这条线在短波波段与实验数据(图中圆点所示)符合得很好，但在长波波段却偏离实验结果。

英国当时正在继续他们的工业革命，正努力提高炼钢技术，他们也在研

究炉温的测量与控制。面对同样的黑体辐射曲线，英国物理学家瑞利和金斯也设想了一个物理模型。与维恩的模型不同，从他们的模型绘出的曲线，即图中的瑞利—金斯线，在长波波段与实验数据符合得很好，但在短波波段则大大偏离实验值，呈现为出现无穷大的发散曲线，学术界称其为“紫外光灾难”。这是因为紫外线比可见光的波长短，紫外线是当时知道的波长最短的电磁波。

“维恩线”与“瑞利—金斯线”均与实验不符，这是为什么呢，这就是开尔文所说的第一朵乌云，来自黑体辐射的困难。

2. 普朗克的突破——量子论的诞生

1900 年的下半年，德国物理学家普朗克在反复考虑黑体辐射导致的困难时，偶然发现，如果认为原子在发射和吸收辐射时，不是连续的，而是一份一份的，每份电磁辐射的能量 E 和频率 υ 之间有如下正比关系(h 是比例常数)：

$$E = h\upsilon \tag{3.2}$$

那么得到的黑体辐射谱的理论曲线将如图 3 - 1 的实线所示，恰好与实验点(图中圆点)相符合。

电磁辐射怎么可能是一份一份的呢？电磁理论和波动光学都告诉我们，辐射应该是连续的。怎么可能不连续呢？普朗克百思不得其解。

物理学是一门实验的科学、测量的科学。一个漂亮的理论，如果与实验不符，一定不会被物理学家所接受。原子辐射或吸收能量时，能量是不连续的，是一份一份的，这个假定虽然看来荒谬，但能得出与实验数据很好符合的理论曲线，那么这一假定就至少可以暂时接受，以后再作进一步的探讨。

于是，普朗克在校内报告了他的这一发现。不过，普朗克很担心这一工作是否有问题，所以在报告时极其谨慎，以至于有些听众认为这次白来了一趟，普朗克教授什么也没有讲出来。

然而，在私下与儿子散步时，普朗克告诉儿子：“我最近有一个发现，这个发现如果是正确的，将可以与牛顿的成就相媲美！”可见，普朗克还是很清楚这一发现的重要性，只不过他当时无法肯定这项发现是否确实无误，因为在他和当时的所有物理学家看来，电磁辐射都应该是连续的，不可能是一份一份的。电磁辐射不连续的想法；无法从麦克斯韦的电磁理论和波动光学理论得到支持。

“人怕出名猪怕壮”。普朗克已经是教授了，弄出个大笑话那多丢人，所以他在公开报告这一成果时十分谨慎。

在德国当教授十分不容易。当时一个系只有一个教授位置，大学不多，物理系更少，普朗克必须如履薄冰。

德国这种学术体制，绝对能够保证教授的质量，但也有缺点，容易妨碍青年学者的成长。老教授不死，或者不从岗位上退下来，年青人就没有法子占位。

量子论就是在这种充满怀疑和犹豫的气氛中诞生的。它的诞生距离开尔文指出这朵乌云的时间，还不到半年。

不过，普朗克提出的量子论是不彻底的。他认为原子在吸收和发射电磁辐射时，辐射能是不连续的，但在辐射脱离原子的时候，会和其他辐射融合在一起，仍然是连续的。由于普朗克一会儿说辐射是不连续的，一会儿又说辐射是连续的，一些人听不明白，有一个记者就问他：“你一会说辐射是连续的，一会儿又说是不连续的，那么到底辐射是连续的还是不连续的呢？”普朗克回答说：“有一个湖，湖旁边有一缸水，有人用小碗把缸里的水一碗碗舀出来倒到湖里，你说水是连续的呢，还是不连续的呢？”这个回答，非常清楚地表达了普朗克对电磁辐射究竟连续还是不连续的理解。不难看出，普朗克认为辐射本质上还是连续的，仅当原子辐射或吸收时，才表现出不连续性。

3. 爱因斯坦的再突破——光量子

1905 年,《德国物理年鉴》收到一篇稿件,作者是名不见经传的人,叫爱因斯坦。这篇文章是解释刚发现不久的光电效应的。作者在文章中指出,辐射不仅在原子发射和吸收它的时候是一份一份的,在脱离原子在真空中运动时依然保持不连续性,依然是一份一份的。也就是说,爱因斯坦认为电磁辐射本质上就是不连续的,是一粒一粒的光量子。爱因斯坦把普朗克的量子说,发展成为光量子说。

普朗克不同意爱因斯坦的看法,不承认脱离原子而存在的光量子。但是爱因斯坦的这一理论可以解释光电效应。物理学是一门实验的科学,实验是检验科学理论的唯一标准。普朗克虽然觉得爱因斯坦的理论十分可疑,但觉得它能解释实验,所以还是同意在刊物上发表这篇文章。他同时又给爱因斯坦写了一封信,提出对他的理论的怀疑。普朗克表现出大家风范,不给小人物设置障碍,还十分客气地向他讨教,后来还派他的助手劳埃去拜会这位初出茅庐的年青人,与他平等地探讨。

普朗克在相当长的一段时间内对爱因斯坦的光量子理论持怀疑和反对的态度。普朗克在给维恩的一封信中谈到光量子理论时说"当然,爱因斯坦的这一观点肯定是错误的"。然而,普朗克没有因为自己有不同意见而阻止爱因斯坦这一理论的发表,后来还连续支持了爱因斯坦的所有论文的发表,使 1905 年成了爱因斯坦的丰收年,使爱因斯坦一下成为了世界著名的物理学家。

一直到 1913 年,普朗克和能斯特一起推荐爱因斯坦担任普鲁士科学院院士的时候,他们在高度评价和赞扬爱因斯坦在众多领域的重大成就的同时,依然表达了对光量子学说的保留。他们在推荐信中说:"总之,我们可以说,在具有丰富内容的现代物理学的所有重大问题上,几乎没有哪个问题没有爱因斯坦的巨大贡献。可能有时他的设想也会迷失方向,例如,他的光量

子假说。但不能以此来否定他，因为即使在最精确的科学中，也不可能不冒一点风险而能提出新的观点。”

具有讽刺意味的是，1922年，在诺贝尔奖评委会决定授予爱因斯坦1921年的诺贝尔物理学奖时，授奖原因不是他的相对论，也不是他的其他成果，恰恰就是他的光量子理论。瑞典皇家科学院宣布的授奖原因是爱因斯坦“对理论物理，特别是对光电效应定律的发现”所作的贡献，也就是他的光量子理论。在通知他获奖的信中还明确告知，“但是没有考虑您的相对论（指狭义相对论）和引力理论（即广义相对论）一旦得到证实所应获得的评价。”这一方面是因为，评委们没有对“相对论”的正确性和重要性达成一致看法，另一方面也许是有些评委还想为他的相对论和引力论再颁一次奖。但后来大概评委会改变了主意，不想给一个人颁两次奖了，所以爱因斯坦没有再次获奖。他对科学和人类的最大贡献——狭义和广义相对论，没有获得诺贝尔物理学奖，这不能不说是诺贝尔自然科学奖的一大遗憾。

4. 第二朵乌云——以太导致的疑难

迈克耳孙实验引出的第二朵乌云与光传播的以太理论有关。

既然光是以太的弹性振动，那么以太相对于地球运动吗？由于地球不是宇宙的中心，以太不可能相对于地球静止，如果以太相对于地球静止，地球参考系岂不成了宇宙中最优越的参考系吗？因此，“以太相对于地球静止”的想法是与哥白尼学说相违背的。当时的科学家已经认识到，不仅地球不是宇宙的中心，太阳也不是宇宙的中心，恒星都是遥远的“太阳”，因此以太也不可能相对于太阳静止。那么以太相对于什么东西静止呢？大家想到了牛顿所说的“绝对空间”。比较自然的想法是，以太相对于“绝对空间”静止。如果以太相对于绝对空间静止，那么在绝对空间中运动的地球，就应该在以太中穿行，也就是说，地球应该相对于以太运动。天文学上观察到的光行差现象，也支持地球相对于以太有运动的观点。

5. 天文学中的光行差现象

我们现在来解释什么是光行差现象。先让我们打一个比方。

在不刮风的下雨天，雨滴会穿过空气垂直下落。这时一个静止的人为了避免被雨淋到，应该垂直打伞。但如果他奔跑，则应该斜着打伞，把伞指向运动的方向，这样他才不会被雨淋到(图 3 - 2)

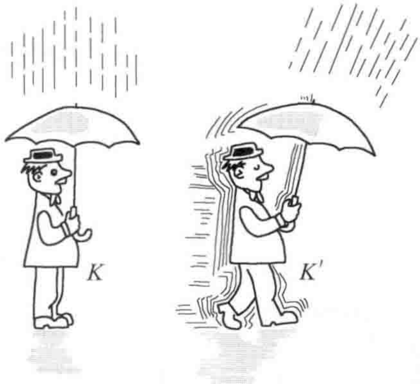


图 3 - 2　雨中打伞的人

同样，如果一个人在不刮风的雨天接雨水，他的桶应该垂直放置。如果他奔跑，为了让雨滴落入桶中，他应该把桶斜放，斜的方向指向桶运动的方向(图 3 - 3(a)，(b))

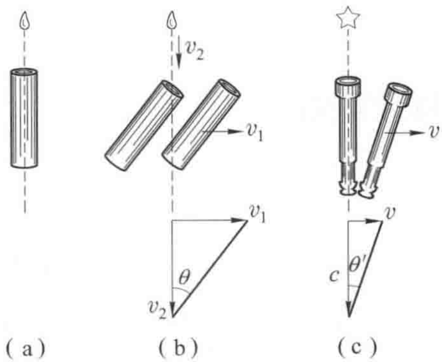


图 3 - 3　接雨水的桶

从遥远恒星射来的光，穿过以太飞来，就像在空气中下落的雨滴一样。以太好比是空气，光好比是雨滴，地球上的望远镜就好比接水的水桶(图 3 - 3(c))。如果地球相对于以太静止，望远镜对准远处的恒星，不用调整方向，

就可以一直接收到恒星射来的光。但天文学家发现，情况不是这样。要想一直观测某颗恒星，必须一年四季不断调整望远镜的指向，这就是“光行差”现象。

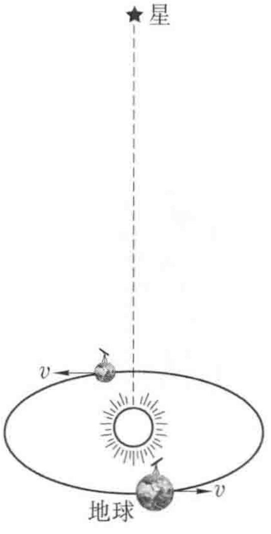


图 3－4 光行差现象

天文学家认为，这是由于地球绕日运动，从而在以太中穿行造成的。由于地球运动，望远镜不能直接指向所观察的恒星，而必须有一个指向地球运动方向的倾角，恒星射来的光才能恰好穿过望远镜筒，抵达观察者的眼睛(图 3－3(c))。

地球绕日运动，方向不断变化，每半年要掉转一次运动方向，所以望远镜要不断改变方向才能一直注视同一颗恒星(图 3－4)。

“光行差”现象支持地球相对于以太运动的观点。一些物理学家很想知道地球相对于以太的速度究竟是多少。由于以太相对于绝对空间静止，知道了地球相对于以太的速度，也就知道了地球相对于绝对空间的速度，因此这是十分有意义的事情。

6. 精密的迈克耳孙实验

为了测量地球相对于以太的速度(即通常所说的以太漂移速度)，美国物理学家迈克耳孙(1852—1931)设计了更为精确的实验。

迈克耳孙年青时曾到德国留学，当时欧洲的科学技术比美国领先。迈克耳孙在德国接触到当时世界上最好的光学仪器和光学技术，研制了以他的名字命名的干涉仪。一直到今天，迈克耳孙干涉仪都在科学研究中广泛使用。

回到美国后，迈克耳孙想用自己从德国学来的先进光学知识、光学技术，以及自己设计的干涉仪来测量以太相对于地球的漂移速度。

他把干涉仪安装在平滑的大石板上，让石板漂浮在水银上，以求仪器装置平稳而且易于移动、转动(图 3－5)。

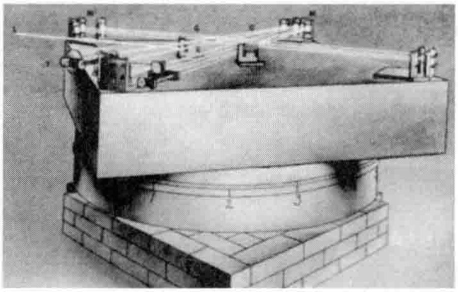


图 3－5　迈克耳孙干涉仪装置

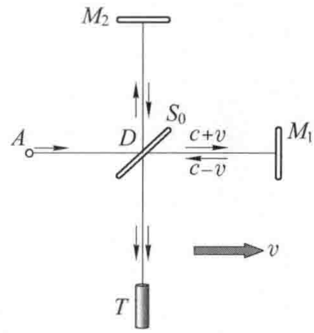


图 3－6　迈克耳孙干涉仪光路示意图

他设计的思路是这样的(图 3－6)。图中 A 是光源，D 为半透明半反射的玻璃片，M_1 和 M_2 为两个反射镜。DM_1 与 DM_2 两臂等长，均为 l_0，T 为观测镜筒的位置。光源 A 射出的光在 D 处分为两束，一束穿过半透玻片 D 到达反射镜 M_1，反射回来后，又在 D 处被反射到达观测镜筒 T。另一束被半透玻片 D 反射，到达 M_2，被 M_2 反射回来再穿过 D 片到达观测镜筒 T。图中 c 是真空中的光速，v 为以太漂移速度，也即以太相对于地球的运动速度。图中画出了以太相对于地球漂移的方向。

7. 河中的游泳者

为了让读者更直观地理解迈克耳孙实验，我们来打一个比方。图 3－7 是一个人在河中游泳的示意图。河水以速度 v 向右运动，河宽 AB 为 l_0。一个人从 A 出发，向下游以速度 u(相对于河水)游 l_0 距离，到达 C 点，再以同样的速度 u 游回 A 点。再让同一个人以速度 u 游向对岸 B 点，然后返回。但要注意，由于河水一直向下游流动，横渡者游泳的方向不能与河岸垂直，而必须向上游方向偏一个角度 θ(图 3－8)，否则他就会被河水冲下去，不可能垂直到达 B 点。这样，他横渡时的渡河速度 u' 将小于他相对于水的游泳

速度 u。

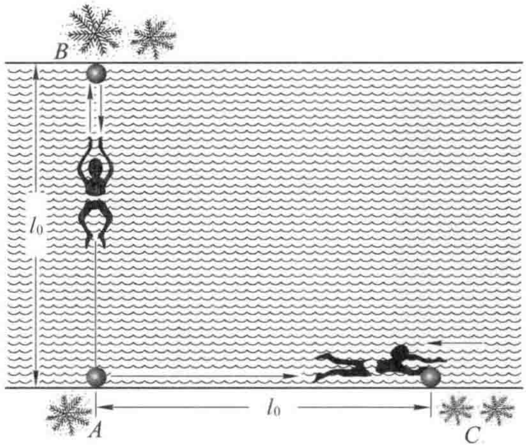


图 3-7　河中游泳的人

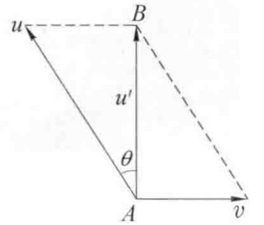


图 3-8　渡河速度合成图

现在我们来比较一下他完成来回横渡的时间，与他从 A 游到 C，再返回的时间，看它们是否一样。注意到 v 是水向下游流的速度，显然人以速度 u（相对于水）从 A 游到 C 再返回的时间是

$$t_1=\frac{l_0}{u+v}+\frac{l_0}{u-v} \tag{3.3}$$

而横渡一个来回的时间是

$$t_2=\frac{2l_0}{u'}=\frac{2l_0}{\sqrt{u^2-v^2}} \tag{3.4}$$

显然 $t_1\neq t_2$，顺着水流方向来回游动的时间 t_1，略大于横渡一个来回所用的时间 t_2。二者的时间差为

$$\Delta t=t_1-t_2=\frac{l_0}{u+v}+\frac{l_0}{u-v}-\frac{2l_0}{\sqrt{u^2-v^2}} \tag{3.5}$$

8. 出人意料的实验结果

游泳的人就像干涉仪中的光，水就像以太。迈克耳孙把干涉仪的 DM_1

臂指向以太漂移方向，也即地球在以太中穿行的反方向。这时 DM_2 臂与以太漂移方向垂直。光在以太中的运动速度为 c。那么，沿臂 DM_1 运动再反射回到 D 的光所需的时间，相对应于游泳者向下游游动再返回的时间。沿 DM_2 运动再反射回 D 的光所需的时间，相对应于游泳者渡河再返回的时间。所以，这两束光的时间差为

$$\Delta t=\frac{l_0}{c+v}+\frac{l_0}{c-v}-\frac{2l_0}{\sqrt{c^2-v^2}}\approx\frac{l_0}{c}\left(\frac{v^2}{c^2}\right) \tag{3.6}$$

显然，沿着光路 DM_1 运动的光(即沿以太漂移方向往返的光)，比沿光路 DM_2 运动的光(即与以太漂移方向垂直往返的光)，所需的时间要长一点。由于两束光有时间差，所以观测者会看到干涉条纹。

这时，迈克耳孙把仪器装置水平转 90°，使原来与以太漂移方向平行的光路 DM_1 变得与以太漂移方向垂直；而原来与以太漂移方向垂直的光路 DM_2，变得与以太漂移方向平行。所以，仪器装置转动 90°后，沿光路 DM_2 运动的光往返一次所用的时间反而比沿光路 DM_1 运动的光所用的时间长。因此，转动前后，两束光分别完成一个往返的时间差了 $2\Delta t$，使得这两束光的光程差改变了

$$2c\Delta t\approx 2l_0\left(\frac{v^2}{c^2}\right) \tag{3.7}$$

这将导致观测者从 T 看到的干涉条纹发生移动。

迈克耳孙等人把这一实验做得十分精细。从观测精度来看，只要以太相对于地球的运动速度 v 不等于零，他们就应该观测到比较明显的干涉条纹移动，但他们始终没有观测到这一移动。这就是说，这一精确的光学实验，没有观测到以太相对于地球的漂移运动。此结果与光行差实验矛盾，而光行差现象是被大量天文观测确认的，以太应该相对于地球有漂移。这是怎么回事呢？这就是开尔文所说的第二朵乌云。

9. 突发奇想——洛伦兹收缩

荷兰物理学家，著名的电磁学权威洛伦兹(1853—1928)反复研究了这

一矛盾。他认为，很可能存在一种以前不知道的物理效应：当一根长为 l_0 的尺子在以太中以速度 v 运动的时候，会沿运动方向有一个缩短效应，长度缩短为 l(图3-9)，而与运动方向相垂直的尺，不产生这一效应。他于 1892 年公布了这一“发现”。

$$l=l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \tag{3.8}$$



图 3-9　洛伦兹的动尺收缩假设

这就是说，按照洛伦兹的新理论，当光路 $DM_1=l_0$ 沿以太运动方向时，其长度将从 l_0 缩短为 l，而此时光路 DM_2 仍保持为 l_0，所以考虑此效应后，(3.6)式应改写为

$$\Delta t=\frac{l}{c+v}+\frac{l}{c-v}-\frac{2l_0}{\sqrt{c^2-v^2}} \tag{3.9}$$

把(3.8)式代入，不难算出 $\Delta t=0$，此时从(3.7)可看出，仪器装置转动 90°引起的光程变化 $2c\Delta t$ 当然也是零。

这就是说，洛伦兹提出的(3.8)式所示的收缩效应，恰好抵消了地球相对于以太运动引起的光程变化，所以干涉条纹不会有移动。这一效应，后来被称为洛伦兹收缩。

洛伦兹收缩似乎解决了迈克耳孙实验与光行差现象的矛盾，第二朵乌云看来并不存在。

10. 凑出的洛伦兹变换

现在考虑两个作相对运动的惯性系。s 系的空间坐标为(x,y,z)，其中

的时间用 t 计量。s'系的空间坐标为(x',y',z')，其中的时间用t'计量。先让s'系的三个轴分别与 s 系的三个轴重合，它们的原点 O'与 O 也重合，现在让 s'系沿 x 轴以速度 v 运动，x'轴与 x 轴一直保持重合；y'轴与 y 轴保持平行，z'轴与 z 轴保持平行；让它们的钟也对准(图 3－10)。

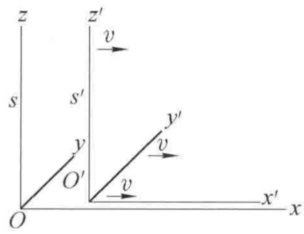


图 3－10　伽利略变换

这时，s'系与 s 系的时空坐标有如下关系：

$$\begin{cases} x'=x-vt \\ y'=y \\ z'=z \\ t'=t \end{cases} \tag{3.10}$$

此关系称为伽利略变换，是物理界早就熟知的。

考虑两根长度都为 l_0 的等长的尺。一根静止于 s 系中，沿 x 轴放置。另一根静置于 s'系中，沿 x'轴放置。由于 s'系相对于 s 系运动，在 s 系中观测，它的尺是静止的，长度为 l_0；而 s'系中的那根尺，由于运动，尺长从 l_0 缩为 l。这就是前面提到的洛伦兹收缩。

洛伦兹遗憾地注意到，从伽利略变换导不出洛伦兹收缩的公式(3.8)。他还注意到，如果用伽利略变换(3.10)，把麦克斯韦的电磁场方程表达式从 s 系变到 s'系，即从用坐标(x,y,z,t)表示，变换到用坐标(x',y',z',t')表示，则电磁场方程的表达式将发生改变，不能保持原来的样子。洛伦兹觉得，这似乎表明电磁规律在不同惯性系中将不同，似乎电磁规律不满足相对性原理。

洛伦兹反复思考这一问题，尝试解决办法。1904 年，他终于又向前走了一步。他凑出一个新的坐标变换来取代伽利略变换，作为两个惯性系之间的变换。这个新变换是：

$$\begin{cases} x'=\dfrac{x-\upsilon t}{\sqrt{1-\dfrac{\upsilon^2}{c^2}}} \\ y'=y \\ z'=z \\ t'=\dfrac{t-\dfrac{\upsilon}{c^2}x}{\sqrt{1-\dfrac{\upsilon^2}{c^2}}} \end{cases} \tag{3.11}$$

此变换后来被数学家庞加莱命名为洛伦兹变换。用这一变换可以推出洛伦兹收缩公式(3.8),而且,麦克斯韦电磁方程组的形式在洛伦兹变换下不变。

洛伦兹认为,自己得到的新变换不仅在数学形式上比伽利略变换复杂,而且物理意义也根本不同。伽利略变换(3.10)中的 s 系和 s' 系是任意两个作相对运动的惯性系,它们的相对运动速度 υ 与绝对空间没有关系。而新变换(3.11)中的 s 系不是任意的惯性系,而是一个特殊的惯性系,是相对于以太静止,也即相对于绝对空间静止的参考系。s' 系相对于 s 系的运动速度 υ,同时也就是相对于以太的运动速度,当然也就是相对于绝对空间的速度。

他还认为,s' 系中的时间是所谓“地方时”,并不是可以真实测量的时间。用 s' 系的坐标表述的几何量和物理量,都不是真实可测的东西。

不过,无论如何,他用自己的新变换(3.11)导出了洛伦兹收缩公式(3.8),而且新变换可以在形式上保证麦克斯韦电磁理论的所有公式在坐标变换下不变。

正当洛伦兹等人为自己的成绩感到自豪,以为他们已经解决了第二朵乌云造成的困难时,爱因斯坦的革命性论文发表了。

第四章　难以理解的相对论

1. 爱因斯坦理论与洛伦兹理论的区别

爱因斯坦这篇划时代论文的核心公式就是洛伦兹变换，他得到的变换公式与洛伦兹的公式(3.11)完全相同，但物理解释却不同。

爱因斯坦坚定地认为相对性原理是一条根本的自然规律，应该坚持。他认为不存在绝对空间，也不存在以太，没有优越参考系，所有的惯性系都是平等的。

他认为洛伦兹变换是任意两个作相对运动的惯性系之间的变换，s 系和 s' 系是完全平等的。这种情况与伽利略变换类似，不过伽利略变换只能近似使用于远低于光速的情况。当相对运动速度很小，$v \ll c$ 时，洛伦兹变换就可以回到伽利略变换。所以，伽利略变换是洛伦兹变换在低速下的近似。当两个惯性系的相对速度 v 趋近光速时，这两种变换的差异就会明显表现出来。这时，只有洛伦兹变换可以使用，勉强使用伽利略变换，就会得到错误的结论。不过，我们日常生活中接触到的运动，其速度都是远远小于光速的，所以人们原来没有注意到伽利略变换的局限性。

爱因斯坦导出洛伦兹变换的方法也与洛伦兹完全不同。洛伦兹是为了解释迈克耳孙实验与光行差现象的矛盾,先提出“洛伦兹收缩”假设,进而凑出洛伦兹变换公式的。洛伦兹没有意识到这个变换的背后存在着根本性的原理。

爱因斯坦则是先提出两条根本性的原理,然后在这两条原理的基础上用数学工具严格推导出洛伦兹变换的。这两条原理,一条就是相对性原理,另一条是爱因斯坦本人提出的“光速不变原理”。

2. 难以置信的“光速不变原理”

爱因斯坦本人高度评价自己提出的“光速不变原理”。他认为,自己的相对论与牛顿经典物理学的分水岭就是“光速不变原理”。这条原理是说,“光的运动速度与光源相对于观测者的运动无关”。也就是说,在任何一个惯性系中的观测者,不管它相对于光源是否运动,运动速度是多少,测得的同一束光的速度都相同,都是同一个值 c。

举一个例子,大家就可以看到这一原理有多么不可思议。如果相对于光源静止的观测者测得的光速是 c。那么一个迎着光以速度 v 运动的观测者测得的速度是多少呢?从人们的常识和物理学中的速度迭加原理看,都应该是$(c+v)$。一个以速度 v 与光同向奔跑的观测者测得的光速是多少呢?从常识和迭加原理看,都应该是$(c-v)$。爱因斯坦的“光速不变原理”却告诉我们,这三个观测者测得的光速都是同一个值 c。这显然不符合速度迭加原理(即平行四边形法则),也似乎与一般人的常识和生活经验完全不符。这一原理太难以让人接受了。

3. 走向“光速不变”的道路

爱因斯坦怎么会想到这样一条原理呢?这是因为他觉得电磁学规律是

大量实验证明的，应该确信麦克斯韦电磁理论的正确性。另外，相对性原理是一条根本性原理，也不应该轻易放弃。按照这一原理，麦克斯韦电磁规律应该在所有惯性系中都相同。然而这一理论的公式中有一个常数 c，即真空中的光速。如果相对性原理对电磁规律成立，那么在所有惯性系中光速岂不都是同一个值 c，与这些惯性系之间的相对运动无关吗？如果各惯性系中的 c 不同，电磁规律的形式在各惯性系中就会有差异，这似乎与相对性原理有矛盾。

正是这一矛盾，迫使洛伦兹在电磁理论和相对性原理之间作一选择，他坚持了电磁理论，放弃了相对性原理。

而爱因斯坦认为电磁理论和相对性原理都是经过大量实验观测证实的，都应该坚持。这样，爱因斯坦就遇到了如何认识光速的问题。

他想到了自己在阿劳中学时思考过的“光速悖论”：既然光是电磁波，那么一个以光速追随电磁波运动的人，岂不就应该看到一个不随时间变化的波场吗？可是为什么谁也没有见过这种现象呢？这至少说明光相对于任何观测者都不可能静止。看来，光对任何观测者都应该运动。但运动速度都相同，都是 c 吗？他又想到了自己思考过的以光速飞翔的小孩，他能从自己举在前方的镜子中看到自己的像吗？光相对于小孩的脸和镜子的速度如果是 c，光相对于地面的速度不就会是 $2c$ 吗？可是谁也没有见过以 $2c$ 运动的光，所见到的光速都是 c，似乎光速不可能大于或小于 c，只能是同一个值 c。

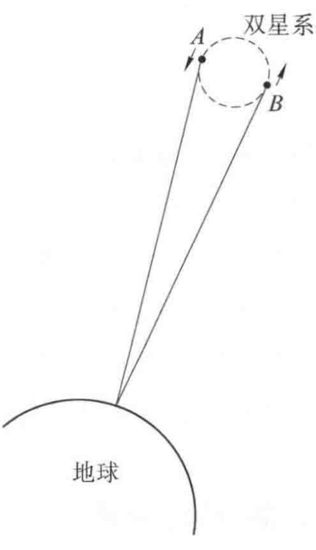


图 4-1　双星的轨道

此外，如果光速与光源运动的速度有关，那么我们观察到的“双星”的轨道就应该发生畸变。所谓“双星”是指由两个恒星组成的“太阳系”，这样的“太阳系”在宇宙空间中存在，我们已观察到许多。双星系中的两颗恒星围绕

它们的质心旋转,有的会向着我们运动,有的会背向我们运动,如果光速与恒星的运动速度有关,这两颗恒星“同时”发出的光,将不会“同时”到达地球。也就是说,我们在地球上“同时”看到的这两颗恒星的位置,是它们不同时刻的位置,这样我们就会看到双星的轨道不是椭圆,会发生畸变。但是,天文学中从来没有看到过发生畸变的双星轨道,这告诉我们,双星的两个成员发出的光的速度都相同,与它们和我们的相对运动无关(图 4-1)。

4. 艰难的思考

对双星轨道的观测,支持光速与光源运动速度无关的看法。爱因斯坦知道这一观测结果,其他科学家也知道这一结果,但一般人都没有从中悟出更深刻的道理。只有爱因斯坦,认识到了这一观测结果支持自己关于光速不变的猜想。从而他最终以原理的形式把它提了出来。应该说明的是,提出“光速不变原理”对爱因斯坦也是一件艰难的事情。他曾在这个问题上耗费了大量时间。

爱因斯坦后来回忆说,坚持“相对性原理”比较容易,伽利略、牛顿和此后的物理学家都在使用这一原理,只是电磁理论与伽利略变换产生矛盾之后,洛伦兹等人对这一原理产生了怀疑。爱因斯坦在“奥林匹亚科学院”时期曾读过马赫的著作。马赫不承认以太,也不承认绝对空间,坚定地认为相对性原理正确。爱因斯坦从那时起就赞同马赫的观点,认为相对性原理是一条应该坚持的、正确的根本性原理。

“光速不变原理”则不同,以前没有人提出过。而且,光速不变原理似乎和力学中的速度迭加原理(即平行四边形法则)矛盾。这是怎么回事呢?这个问题长时期困扰着年轻的爱因斯坦,他觉得“这可真是个难解之谜”。

5. 思想的突破

1905 年 5 月的一天,爱因斯坦带着这个问题拜访了他的好友贝索。

贝索也曾是“奥林匹亚科学院”的一位成员。爱因斯坦回忆道，那是一个晴朗的下午，经过一个下午的讨论，爱因斯坦突然明白了，问题出现在“时间”上。通常的时间概念值得怀疑。“时间并不是绝对确定的，而是在时间与信号速度之间有着不可分割的联系。有了这个概念，前面的疑难也就迎刃而解了。”

五周之后，爱因斯坦建立相对论的论文就完成了。

爱因斯坦在与贝索的讨论中究竟明白了什么呢？他想明白了，两个不同地点的时间“同时”，不是想当然就存在的绝对概念。必须有一个可以操作的办法，把放在两地的钟校准，才能使它们同时或同步。

A 地与 B 地各有一个钟，怎么才能把它们校准呢？观测者 A 可以从 A 点发射一个信号到 B，告诉 B 点的观测者现在 A 处的时间，观测者 B 再把他的时间也调到这一时刻，这不就把两个钟对好了吗？可是，事情并不是这样简单。信号从 A 走到 B 是需要时间的，需要多少时间呢？应该首先知道信号的传播速度，但是要想知道信号传播速度，又必须先把两地的钟对好。于是，我们陷入了一个无法解脱的循环。

与爱因斯坦同时代的大数学家庞加莱就主张，在“对钟”之前要首先“约定”(也就是“规定”)信号的传播速度。庞加莱知道，当时已知的最快的信号速度是光速，而且他猜测光速有可能是自然界中传播最快的速度，甚至有可能是极限速度。爱因斯坦在“奥林匹亚科学院”的活动中，就曾读过庞加莱的著述，他们这帮青年人曾为庞加莱书中的内容长时间激动不已。与贝索的讨论可能使爱因斯坦回忆起了以前读过的庞加莱的一些观点，这帮助他找到了突破口。

爱因斯坦就确定用光来传播信号。他约定(也就是规定)光速各向同性。也就是说，规定在真空中，光从 A 运动到 B 的时间和从 B 返回到 A 的时间相等。

他让 A 点的观测者在t_A时刻向 B 发射一个光信号，B 处有一个钟和一面镜子，光信号到达 B 的时刻是t_B，镜子立刻把光反射回去，光信号返回到

A 的时候 A 钟的时刻为t'_A。爱因斯坦就定义t_A与t'_A的中间时刻$\tilde{t}_A$是与t_B同时的 A 钟的时刻(图 4-2)。即

$$\tilde{t}_A=\frac{t_A+t'_A}{2}=t_B \tag{4.1}$$

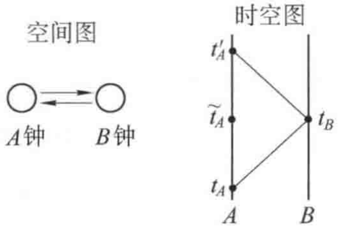


图 4-2 用光信号对钟

这样,爱因斯坦就解决了对钟的问题,找到了定义 A 点和 B 点的钟“同时”的办法。

6. 同时的相对性

爱因斯坦认为,由于“光速不变原理”,各惯性系中的光速都是同一个值 c,因此在所有惯性系中都可以用这一方法对钟,定义“同时”。不过,各惯性系中定义的“同时”一般会不同。也就是说,对于 A 处与 B 处两个地点发生的不同事件,在一个惯性系中看如果“同时”发生,在另一个惯性系中看,就可能不“同时”。爱因斯坦称这种情况为“同时的相对性”。也就是说,“同时”并不是像一般人想象的,是一个绝对的概念,而是一个相对的概念。

为了更好地理解“同时的相对性”,我们先回顾一下“同地的相对性”。众所周知,两件事情是否发生在同一个地点,是一个相对的概念。在公交车上,乘客站在售票员对面,乘客把钱给售票员,售票员撕了一张票给他。“递钱”和“递票”这两件事是否发生在同一地点呢?由于乘客一直站在售票员对面没有动,所以车上的人都认为这两件事发生在同一个地点。但在车下的人却不这么认为,他认为“递钱”时车刚起动,还未离开车站,“递票”时车已离开车站

一段距离了。这两件事不是发生在同一个地点。所以,两件事是否发生在同一个地点,不同参考系中的人会有不同的看法,这一点似乎大家都明白。

但是,依据我们的日常生活经验,两件事情是否“同时”发生,似乎是一个绝对的概念。例如,在一辆公交车上,有两个孩子,在车头和车尾各放一个炮仗。如果车上的人认为他们是同时放的炮仗,车下的人呢?车下的人是否也认为他们是同时放的呢?按照我们的日常生活经验,车下的人似乎也会认为他们是同时放的炮仗。但是相对论告诉我们,只要车一直在跑,在车下的人看来,这两个炮仗就会是不同时放的,一个炮仗先响,另一个炮仗后响。不过,由于汽车的速度太低,远低于光速,所以这点差异显现不出来。如果汽车的速度可以与光速相比,例如达到光速的一半,这个时候“同时相对性”的效应就会很明显,地下的人会很清楚地感到两个炮仗不是同时响的。正是由于我们通常接触到的交通工具(汽车、火车、飞机等)速度都太低,“同时相对性”的效应显现不出来,所以我们一直误以为“同时”是一个绝对的概念。

“光速不变原理”必定导致“同时的相对性”。而“同时的相对性”正是爱因斯坦相对论的核心概念。弄懂了这一概念,相对论的所有问题就都迎刃而解了。

在相对论中,“同时的相对性”是洛伦兹变换的推论。从洛伦兹变换可以很容易地证明同时的相对性,读者可以在任何一本介绍相对论的教科书中找到有关证明。

爱因斯坦还认识到,物理学中长期沿用的速度迭加原理(即平行四边形法则),在相对论中不再成立,需要修改。所以,光速不变原理与速度迭加原理的矛盾,可以通过修改速度迭加原理来得到解决,下面我们将谈到这一点。

7. 动尺收缩

在相对论中,洛伦兹收缩公式(3.8)可以从洛伦兹变换公式(3.11)推出。

在 s 系和 s' 系中沿 x 轴(当然也就沿 x' 轴)平行放置两根尺,它们静止

时的长度均为l_0。当s'系沿x轴方向运动时，在s系中看，自己的尺是静尺，长度保持为l_0，而s'系中的尺在以速度v运动。当s系中的观测者用自己的尺“同时”去量s'系中的尺的两端时，他发现s'系中的那根尺的长度缩短了，变成了l，

$$l=l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

此式正是洛伦兹收缩公式(3.8)。

在s'系中的观测者看来，自己的尺是静尺，长度一直是l_0，而s系中的尺以速度v反向运动。当s'系中的观测者用自己的尺“同时”去量静止在s系中的尺(对s'系是动尺)的两端时，也发现s系中的尺缩短了，长度缩成了l。

双方都认为对方的尺缩短了，都认为对方的尺产生了洛伦兹收缩。谁对呢？都对。这是因为双方都依据自己的钟“同时”去量对方尺的两端。而s系中的“同时”，不是s'系中的“同时”；反过来，s'系中的“同时”也不是s系中的“同时”。

测静尺不需要“同时”去量它的两端，因为静尺不会动，老停在那里，是否“同时”去量两端没有关系。而量动尺的长度则必须“同时”去量它的两端，否则它就移动了，跑过去了，不可能确定它的长度。

当s系中的观测者“同时”去量静止于s'系中的尺(即动尺)的两端时，s'系中的观测者用自己的钟判断，认为s系中的观测者并未“同时”去量自己尺的两端，而是先量了自己尺的一端，然后才量另一端，所以会认为自己的尺缩短了。s系中的观测者也有类似的看法，认为s'系中的观测者并未“同时”测量自己尺(即静止于s系中的尺)的两端，所以才会认为自己的尺缩短了。

相对论的这一“动尺收缩”结论与洛伦兹的“收缩”观点不同。相对论认为动尺收缩是一个相对的概念。洛伦兹则认为，自己提出的动尺收缩效应是绝对的。相对于绝对空间和以太静止的尺不会收缩，收缩的只是那些相对于绝对空间运动的尺。洛伦兹还认为，自己提出的洛伦兹收缩是一个真实的物理效应，运动的原子会由于“收缩”而变扁，内中的电荷分布会发生变

化。相对论则认为动尺收缩只是一种时空效应,运动的原子不会真的变扁,电荷的分布也不会发生变化。

相对论中的动尺收缩效应,后来依然称为洛伦兹收缩,但含义已不是洛伦兹的原意了。洛伦兹变换的名称也依然保留,但也与洛伦兹当年的理解不同了。

刚开始时洛伦兹是反对爱因斯坦理论的。他觉得自己的理论与爱因斯坦的理论形式相似,公式相同,别人不好区分,就建议把爱因斯坦的理论称为"相对论"。爱因斯坦觉得这个名称还可以,就同意了,这就是"相对论"名称的由来。经过多次讨论,后来洛伦兹接受了爱因斯坦的理论,承认了"相对论"的正确性。

8. 动钟变慢

相对论还预言运动的钟会变慢。设想在 s 系中沿 x 轴放置一系列钟,把它们校准,即对好时刻。在 s'系中也沿 x'轴放置一系列钟,同样把它们校准(图 4-3)。

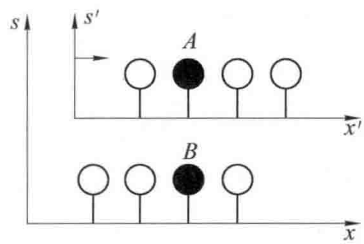


图 4-3　动钟变慢

在 s 系中看,静置于 s'系中的钟都是动钟。s 系中的观测者关注任意一个 s'系中的钟(图中黑点所示)。这个动钟在运动过程中依次和 s 系中的一系列钟相遇。每与一个 s 钟相遇,与它相遇的 s 钟就比较一下双方的时间。由于 s 系中所有的钟都是同步的,s 系中的观测者就会发现,运动的那个钟(即图 4-3 中黑点所示的静置于 s'系中的那个钟)越来越慢。用洛伦兹变换公式(3.11)可以算出变慢的情况:

$$\Delta t=\frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \tag{4.2}$$

Δt_0 是动钟走过的时间,Δt 则是静止于 s 系中的钟走过的时间。我们看到,

当 $\Delta t_0=1$ 时，肯定有 $\Delta t>1$。显然，在 s 系中的观测者看来，运动的钟变慢了。

反过来，静止在 s' 系中的观测者，也可用自己的一列钟与任意一个动钟比较。对他来说，动钟就是静止于 s 系中的钟。我们任意选择一个 s 系中的钟，用图中 s 系中的黑点表示。s' 系中的观测者看到，这个动钟依次从自己的一列钟前面运动过去。在与自己的一列钟相继核对过后，s' 系中的观测者也会认为这个运动的钟变慢了。变慢的程度也如(4.2)式所示，Δt_0 仍是动钟走的时间，Δt 仍是静钟走的时间，但是现在这个动钟与上例中的那个不同，它是固定在 s 系中的钟；现在的这一系列静钟也不是 s 系中的钟而是 s' 系中的钟了。

相对论认为，动钟变慢也是相对的。静止在任何一个惯性系中的观测者，都会认为自己的钟没有变慢，而是相对于他运动的那个钟变慢了。

应该注意，在所有这些例子中，动钟都是一个，虽然是任意选定的一个，但肯定只是一个，而静钟都是一系列。所以，都是单独的那个动钟，比一系列静钟变慢了。

动钟变慢的效应，已有不少实验验证。例如，有一种寿命极短的基本粒子——μ 子，在地球上测量静止 μ 子的平均寿命为 2.2 微秒(μs)，当它以接近光速的速度 $0.995c$ 运动时，寿命可延长到 22 微秒。实验观测与理论计算符合得很好。

9. 速度迭加公式——拒绝超光速

爱因斯坦在相对论中得出了一个速度迭加公式，解决了光速不变原理和经典物理学中的速度迭加公式(即速度迭加的平行四边形法则)的矛盾。他认为原来的速度迭加公式对于高速运动的物体不成立，应该放弃，而应代之以一个新的迭加公式：

$$u=\frac{u'+v}{1+\frac{u'v}{c^2}} \tag{4.3}$$

我们用图 4－4 来说明公式(4.3)。一列以速度 $v=0.9c$ 飞奔的火车,车顶上有一个以速度 $u'=0.9c$ 相对于火车飞跑的人,这个人相对于地面的速度 u 是多少?若按照通常的经典物理学中使用的速度迭加公式,应该有:

$$u=u'+v \tag{4.4}$$

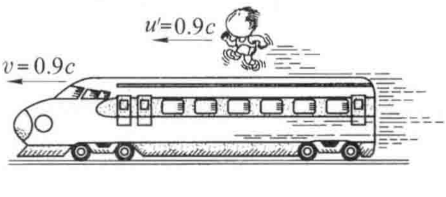


图 4－4　速度迭加示意图

我们将得出奔跑者相对于地面的速度为 $1.8c$,这个人将作超光速运动!这是真的吗?相对论认为,这不是真的。真正正确的速度迭加公式应该是(4.3)式,按照这个公式算出的奔跑者相对于地面的速度是 $0.994\,5c$,依然小于光速。

事实上,从(4.3)式可以证明,通过相对论中的速度迭加,不可能使亚光速的物体达到光速,更不用说超光速了。

从(4.3)式不难看出,即使在 $u'\to c$,同时有 $v\to c$ 的极端情况,也只能得出 $u\to c$,仍然不可能出现超光速的情况。

读者还不难看出,当 $u'\ll c$,$v\ll c$ 时,相对论公式(4.3)回到经典的速度迭加公式(4.4)。可见,经典的速度迭加公式(平行四边形法则)只是相对论速度迭加公式在低速下的近似。由于在近代物理和现代工业诞生之前,人类从来没有接触过接近光速运动的事例,所以长期把平行四边形法则视作绝对正确的速度迭加公式。相对论的出现,终于改变了人们的这一认识。

10. 双生子佯谬——这是真的吗

在动钟变慢的讨论中,常常有这样的问题:如果有两个在一起的钟,分别向不同的方向以不同方式运动,双方都认为自己是静止的,对方在运动,

对方会变慢，它们再次相遇后，到底哪个钟会变慢呢?

如果两个钟都一直坚持作惯性运动，即都一直作匀速直线运动，那么它们根本不可能再次相遇。必须至少其中一个钟有加速和减速的过程，它们才可能分别后又重新相遇。不过，即使其中一个钟有加速、减速过程，或两个钟都有加速、减速过程，其中任何一个钟似乎都可以认为自己是静钟，对方是动钟，对方会变慢。

到底哪一个变慢，是不是真的有这种变慢效应存在，在学术界曾引起长期争论。

法国物理学家郎之万具体提出了一个例子，供大家讨论。

设想地球上有双胞胎兄弟，哥哥乘宇宙飞船到外太空去旅行，弟弟留在地面上。多年后，哥哥完成对遥远的外星的访问，返回来了。这时他们哪一个年轻? 还是一样年轻? 留在地球上的弟弟，可以认为一直近似处在静止状态，地球绕日那点运动可以忽略。哥哥飞出去先经历一个加速过程，到达外星时又经历一个减速过程，返回时重新经历一次先加速后减速的过程。所以弟弟一直处在惯性状态，哥哥则不是。图 4－5 是一张示意图。

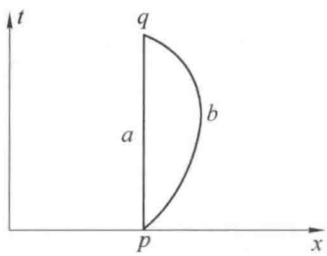


图 4－5　双生子佯谬的时空图

我们知道，一个人在三维空间固定，可以看作一个点。但如果把时间加进来，作为第四维，我们就得到一个四维时空。在四维时空中，一个人不会再是一个点，由于时间在流逝，他一定会在四维时空中描出一根线，这种四维时空中的曲线，在相对论中称为世界线。在空间不动的人，会描出一根与时间轴平行的世界线，作匀速直线运动的人会描出一根斜的世界线，这两种世界线都是直线。一个作变速运动的人则会描出一根弯曲的世界线。图 4－5 中，a 就是留在地球上的弟弟的世界线，b 是哥哥的世界线，他往返时各经历了一次先加速后减速的过程，所以世界线是曲线。在时刻 p，哥哥离开弟弟外出旅行，在时刻 q 返回到地球，与弟弟重逢。重逢时两人一样年轻吗? 相对论认

为，一个人描出的世界线的长度，就是他经历的时间。现在，两条世界线明显不同，长短应该不一样。谁经历的时间长呢？有的读者会说，哥哥经历的时间长，因为他的世界线是曲线，曲线肯定比直线长，所以哥哥应该年老。这错了。因为曲线 b 比直线 a 短，所以哥哥会比弟弟年轻。为什么曲线反而比直线短呢？这是因为相对论中的几何不是通常的欧氏几何，在欧氏几何中，斜边的平方等于两条直角边的平方和。所以曲线一定比直线长。而相对论中的四维时空（称为闵可夫斯基时空）是伪欧时空，斜边的平方等于两条直角边的平方差，所以曲线反而比直线短。

通过相对论的认真研究，确认了作星际旅行的宇航员经历的时间会比地球上的人经历的时间短，所以哥哥将比弟弟年轻。这就是著名的双生子佯谬。

“谬”是“错误”的意思，“佯”是“假”的意思。“佯谬”就是“假错误”，当然也就是正确的了。

11. 双生子佯谬有多酷

人类早已开始做宇宙航行，已经有不少飞上太空的宇航员，还有一些宇航员曾到月球去旅行，然后又返回了地球。但我们似乎没有感觉到他们比地球上的同龄人年轻啊，这是怎么回事呢？

这是因为他们还飞得不够快、不够远，加速和减速的时间也太短，所以“双生子佯谬”效应在他们身上几乎看不出来。

如果他们到更远的星球去旅行，经历加速和减速过程的时间大大加长，最关键的是他们的飞行速度要接近光速，则“双生子佯谬”的效应将会十分明显。

有人计算过，如果一艘飞船去比邻星旅行，双生子佯谬的效应会有多大。比邻星距离我们 4 光年，也就是说它的光传过来需要 4 年时间，真是够远的。但在天文学上，这是一个很近的距离，比邻星是离我们最近的一颗恒

星(太阳除外)。我们通常熟知的牛郎星距我们 16.5 光年,织女星 26.3 光年,“牛郎”距“织女”16 光年,他们之间一个电报往返需要 32 年,真是难以想象,他们怎么能在每年农历的七月初七会面?

科学家设想,飞船先以 $3g$ 的加速度(g 是重力加速度)加速,即以通常地面上的重力加速度的 3 倍加速,这是一个人可以较长时间承受的加速度。加速时宇航员会感受到超重现象,重 80 千克的人,以 $3g$ 的加速度加速时,体重会变为 240 千克。如果飞船的加速度太大,宇航员会被压坏。

他们设想以 $3g$ 的加速度把飞船加速到接近光速的 25 万千米/秒,然后关闭发动机,飞船作惯性飞行,宇航员处于失重状态。快到比邻星时,飞船反向加速,使速度降到零。在比邻星附近的行星降落探测后,再以同样的方式先以 $3g$ 加速,再改作惯性飞行,然后再以 $3g$ 减速返回地球。计算表明,地球上的人认为飞船往返用了 12 年时间,而宇航员则觉得自己只飞行了 7 年。所以回到地球上的哥哥,会比留在地球上的弟弟年轻 5 岁。

如果认为这一效应还不够明显,则可以让飞船到银河系中心附近旅行一次。太阳系距离银心 2.8 万光年。飞船先以 $2g$ 的加速度一直加速,飞到路途的中点后再以 $2g$ 的加速度反向加速。在银心附近完成考查后,再以同样的方式返回。计算表明,宇航员觉得完成此次飞行用了 40 年。如果他们 20 岁时离开地球,60 岁回来,还是可以的。那么地球上的人呢?地球上的人会觉得飞船经历了 6 万年才回来!回来时,宇航员认识的人都早已作古。如果真的完成了这样一次宇宙航行,飞船返抵时,地球人肯定会开一次盛大的庆功会,欢迎自己 6 万年前的祖宗回来了!

我们看到,处于惯性状态的人经历的时间最长,经历加速过程的人会显得年轻。有人会想,在火箭上的人看来自己没有动,地球跑出去转了一圈回来,地球经历了加速过程,似乎地球人应该更年轻。到底谁年轻呢?宇航员在加减速过程中感受到了惯性力,他们是真加速。他们看到的地球人的加速是表观加速、假加速,因为地球人没有受到惯性力。所以结论是肯定的:宇航员更年轻!

12. 星际飞行员感受到的相对论效应

除去双生子佯谬导致的时间效应外，高速飞行的星际飞船上的宇航员还会看到两种景象：一种是多普勒效应造成的，另一种是光行差效应造成的。

由于多普勒效应，飞船前方的星体射来的光会发生蓝移，后方和侧面星体射来的光会发生红移。因此，宇航员觉得前方的星体颜色变蓝，后方的星体颜色变红。侧面的星体由于横向多普勒效应，也会略微变红。

光行差效应会使宇航员觉得侧面的星体向正前方聚集，后面的星体移向自己的侧面。总之，正前方好像是一个“吸引”中心，随着飞船速度的增加，所有的星体都向那里集中，后方的星体越来越少。从地球起飞，正在远离太阳系的飞船上的宇航员，会觉得太阳系不在飞船的正后方，而在侧后方，飞船越接近光速，太阳系看起来越远离正后方，随着飞船速度的增加，太阳系从自己的侧面向侧前方移动。当飞船的速度非常接近光速时，他将看到太阳系处于自己的侧前方，飞船的后方已经没有任何星体了。飞船正在逃离太阳系，而在宇航员看来，太阳系不位于飞船的后方，而位于侧前方，这是多么奇妙的情景啊！

图 4 - 6 显示的是当宇宙飞船向北极星飞去时宇航员看到的景象。当飞船速度远小于光速时，宇航员看到的天象与地面上的人看到的相同，北极星位于正前方，北斗、仙后等星座围绕着它，南天的星座都看不到。当速度达到光速的一半时，飞行员前方的景象大大变化了，北极星周围的星座都在向中央趋近，挤到虚线范围以内，原来出现在飞船后面的天蝎座和天狼星(大犬座 α 星)也都进入前方的视野。当飞船速度加快到 $0.9c$ 时，南天的十字座和老人星等(这些位于南天的星，生活在地球北半球的人原本看不到)也出现在前方了。飞船速度再进一步趋近光速时，整个南天的星系就都挤到前面去了。

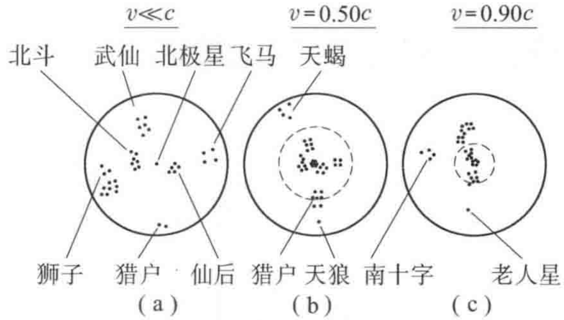


图4-6 飞船速度不同时宇航员看到的景象

在图3-2和图3-3中,我们曾用打雨伞的人和接雨水的桶来比喻天文学中的光行差现象。从中容易理解,在运动观测者看来,光线(即图中的雨滴)的来源方向会向自己的正前方聚集。所以,高速飞行的飞船上的宇航员,会观察到所有星系都向正前方汇聚的现象。

上述多普勒效应和光行差现象与飞船发动机是否关闭,飞船是否做加速运动无关,只与飞船的运动速度有关。

宇航员除去看到上述两种景象并感受到双生子佯谬造成的效应之外,还会感受到其他一些相对论效应,例如超重和失重现象。

当飞船关闭发动机、加速度为零时,宇航员会处于完全失重的状态,这时飞船沿测地线飞行。当飞船加速时,宇航员将感受到惯性力,加速度很大时他们会感受到超重现象。当飞船转动时,宇航员将感受到惯性离心力和科里奥利力。由于等效原理,在飞船那样狭小的空间区域内,飞行员无法区分这些惯性效应造成的力和万有引力,因此加速运动和转动形成的惯性力,可以视做人造重力来加以利用。例如,在未来的星际航行中,可以通过制造人造重力来缓解长期失重给宇航员生理机能带来的不利影响。

第五章 相对论的进展

1. 存在争议的质量公式

相对论诞生之前，洛伦兹在 1904 年给出了电子的质量公式：

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \tag{5.1}$$

式中 m_0 是电子在静止时的质量，m 则是电子在以速度 v 运动时的质量。他是在研究电子在电磁场中的运动时，提出这一公式的。根据这个公式，电子在运动时质量会增大。当时的一些实验，也支持运动电子的质量会增加的观点。

爱因斯坦的相对论证明了质量公式的正确性。相对论认为，这一公式不仅对电子成立，对任何物体均成立。

m_0 称为物体的静质量，m 称为动质量。从公式可以看出，当物体速度增加时，它的动质量也会增加，当运动速度趋近光速时，动质量会趋于无穷大，真有点令人不可思议。这个公式也表明，不可能有任何方法，把一个静质量不为零的物体加速到光速，更不用说使它超光速了。

从此式还可以看出，光子不可能有静质量，否

则 m 会趋于无穷大。事实上，光子的静质量确实是零。

目前，相对论界对于动质量能否算作质量有争议。一些科学家认为，只有静质量才是真正的质量，动质量不是真正的质量，只不过是个为了运算方便而引入的符号而已。持这种观点的好处是，质量将是一个常数。不过，如果动质量不算作质量，则必须放弃质量守恒定律。基本粒子的实验表明，一个电子与一个正电子相遇，会转化为两个光子。电子和正电子都有静质量，m_0 不是零，但变成光子后，静质量消失，光子只有动质量。如果动质量不算质量，则质量守恒定律将不成立。当然，光子还有能量，在这个实验中，能量守恒定律依然成立。

爱因斯坦在论文中是赞成动质量是真质量的观点的。当然，有的研究材料说，爱因斯坦后来曾在私下表示过，可以接受动质量不算作质量的观点。但是他从来没有在公开的场合或论文中说过动质量不算质量。

关于质量公式的争论看来还将继续下去。

2. 质能关系——开启核能的大门

爱因斯坦在 1905 年 11 月发表的有关相对论的第二篇论文中，提出了一个重要的公式：

$$E=mc^2 \tag{5.2}$$

这个公式称为质能关系式，它表明，质量和能量好像是同一事物的两个侧面，任何质量都含有能量，任何能量也都具有质量。人们把上式显示的，物质蕴藏的能量称为固有能。

上面我们曾经谈到动质量和静质量的概念。一块静止的质量，当然也含有固有能，对于静质量，上式可以写作

$$E_0=m_0c^2 \tag{5.3}$$

质能关系式意义重大。它显示任何一块很小的质量，都蕴含着难以置信的大量固有能。

1 克任何物质(例如水),它所蕴藏的固有能如果转化为光能和热能的形式,则相当于 2 万吨 TNT 炸药所释放的化学能。在日本广岛爆炸的那颗原子弹,造成了巨大的损害,但是其威力其实只是相当于几克物质的固有能被转化成了光能和热能。

相对论开辟了新的无止境的能量源泉。这个公式告诉我们,自然界并不缺少能量,只是人类掌握它们的能力还不够。核物理的发展,证实了这个公式的正确性。因此,质能关系可以视为制造原子弹、发展核能源的重要理论基础。原子能的和平利用,节约了宝贵的石油资源。近代以来,石油被大量地用作能源,被大量地燃烧。其实这是一种巨大的损失。石油是重要的化工原料,用作燃料实在是太可惜了。门捷列夫曾经感叹:“要知道,钞票也是可以用来生火取暖的。”

利用(5.1)式,不难从(5.2)式和(5.3)式得出相对论的动能表达式:

$$T=mc^2-m_0c^2=m_0\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}-1\right)c^2=\frac{1}{2}m_0c^2+\frac{3}{8}m_0\frac{v^4}{c^2}+\cdots \quad (5.4)$$

我们看到,牛顿力学中的动能只是上式右边的第一项。当物体运动速度接近光速时,后边各项的贡献就将显示出来。可见,牛顿力学的动能表达式只是相对论动能在 $v \ll c$ 时的近似表示。

3. 狄拉克:真空不空

相对论还得到了一个能量、动量和质量之间关系的新公式:

$$E^2=p^2c^2+m_0^2c^4 \quad (5.5)$$

其中,E、p、m_0 分别是粒子的能量、动量和静止质量。把这个公式开方,不难看出,能量有正负两部分:

$$E=\pm\sqrt{p^2c^2+m_0^2c^4} \quad (5.6)$$

但是,我们只见过正能量,从来没有见过负能量,这是怎么回事呢?

狄拉克在研究高速运动的电子时,发现电子遵守这个公式。图 5-1 给出了依据(5.6)式画出的电子能级图。能级分正、负两个区域,中间还有一个禁区,不允许电子存在。

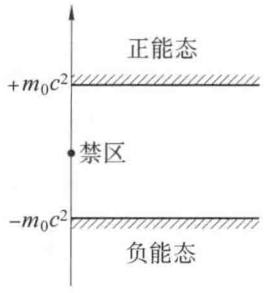


图 5-1 电子正、负能级图

我们只见过正能电子,谁也没有见过负能电子。而且,电子负能状态的存在,使得我们日常见到的电子都有可能不稳定。正能电子虽然不能进入禁区,但可以跳过禁区进入负能态,成为负能电子,并放出能量,例如光子。这种情况和原子核外的电子有点类似,电子只能存在于特定的轨道(能级)上,不能存在于两个轨道(能级)之间的禁区,却可以从一根轨道跳入另一根轨道(从一个能级跃入另一个能级),并放出光子。

而且,从狄拉克给出的电子能级图看,负能级没有下限。负能电子应该能够往更负的能级跑,一边降能级一边往外辐射能量,这种过程可以无止境,放出的能量可以无限多。

但是谁也没有见过上述两种情况,既没有见过正能电子变成负能电子,更没有见过负能电子往更低的能级跑。实际上,根本就没有人见过负能电子,这是怎么回事呢?

狄拉克想到了泡利不相容原理。这是德国物理学家泡利,当初为了完善玻尔原子轨道模型而提出的一个原理。这个原理说,一个电子状态只能容纳一个电子,每根电子轨道上有两个可能的电子状态,因而每根轨道上最多可以容纳两个电子。把这一原理与玻尔模型相结合,就能很好地说明原子核外电子的层级分布,既能解释光谱线,又能解释元素周期律,还很好地说明了原子的稳定性。

狄拉克想,泡利不相容原理可以用来解释上述正、负能级图。

他认为,所谓真空,并不一定什么都不存在。真空实际上是能量最低的状态。电子真空,就是电子的能量最低状态。

什么时候能量最低呢？并不是一般人想象的:一个电子都没有的状态能量最低。能量最低的状态,应该是所有的正能态都空着,而所有的负能态都已填满的状态。

这正如一个人什么时候最穷呢？身无分文还不是最穷的时候,因为欠债的时候比身无分文还穷。最穷的人应该是不仅身无分文,还欠债欠到了可能的最大允许值的情况。所有可借钱的地方都借到了,而且都借到了不可能再借的程度,这时一个人处在最穷的状态。

狄拉克对真空的理解,非常了不起,具有极大的启发性。由于负能态都已填满,正能电子不可能跳过去,所以正能电子所处的状态也就稳定了。

4. 预言存在反物质

狄拉克认为,真空并不是一无所有的状态,而是所有正能态都空着,而所有的负能态都已全部填满的状态。真空态中没有正能粒子,但存在无数我们探测不到的负能粒子。在通常的生活中,我们感受不到这种负能粒子的存在。

狄拉克对真空的认识正确吗？能不能用实验证明呢？

狄拉克回答说:能！如果他对真空的理解是正确的,就可以从真空中打出电子来。他设想,把重原子核看作铁砧,用宇宙线中的轻一点的原子核作铁锤。在铁砧和铁锤之间一定有真空存在,让宇宙线高速地撞在重核上,就对夹在两者之间的真空进行了“打击”,这种“打击”如果够猛烈,将会把处在负能态的电子打出来(图 5 - 2)。实际上就是通过这一“打击”过程,给予处在负能态的电子能量,使它们获得能量得以跃过禁区,跳到正能态,成为我们可以观测到的正能电子。

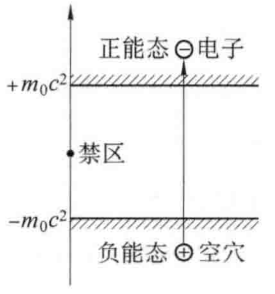


图 5 - 2　打击真空正能电子与负能空穴

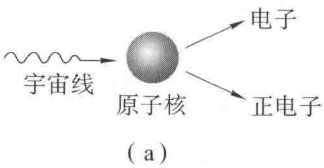
狄拉克进一步认为,负能电子跃入正能态后,会留下一个空穴。这个负

能空穴应该带正电，这样才能保证电荷守恒。

狄拉克最初认为“负能空穴”可能是质子，因为质子是当时仅知的带正电的粒子。但科学家们很快就认识到不可能是质子。质子与电子质量差1 800倍，太不相称了。而且从狄拉克真空的能级图看，使一个负能电子跃过宽度为 $2m_0c^2$ 的禁区，至少应该赋予它两倍的电子静能(m_0c^2)，可是跳到正能态的电子只有一个电子的静能，另一个单位的电子能量哪里去了呢？如果消失了，就会破坏能量守恒定律和质量守恒定律。要保证这两个定律正确，唯一的可能是把另一个单位的电子能量(m_0c^2)留给空穴。所以，“负能空穴”应该是一种带有正电荷和一个电子质量的未知基本粒子。人们称其为正电子。要注意，这种正电子是正能粒子。也就是说，“负能空穴”是一种带正能量的粒子。

5. 赵忠尧与安德孙的发现

后来的研究发现，所谓用铁锤和铁砧打击真空的图像是错误的(图5-3(a))。正电子产生过程，实际上是宇宙学中的 γ 射线(光子)撞在重原子核上，光子把负能电子打到正能态，产生一个带负电的正能电子和一个带正电的正电子(负能空穴)的过程(图5-3(b))。人们进一步认识到，这实际上是光子转化为正负电子对的过程。这里所说的“负电子”不是“负能电子”，而是我们日常所见的带负电的正能电子。正负电子对中的两个粒子都具有正能量，只不过一个带正电，另一个带负电。不仅光子(或光子对)可以转化为正负电子对。正负电子碰撞，也可以湮灭为两个光子。



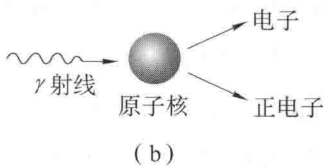


图5-3　γ射线转化为正负电子对

我国留美学者赵忠尧首先在实验中观测到了正负电子对的产生和湮灭。但他的头脑中没有“正电子”的概念,因而没有对自己的发现作出正确的解释。而且,当时有两个小组的错误观测结论把水搅混了。当时中国人受洋人歧视,外国学者不认为中国人能作出重大发现,所以学术界相信了那两个错误实验,忽略了赵忠尧的正确的重要发现,使赵先生与诺贝尔奖失之交臂。

不久之后,美国学者安德孙也在实验中观测到了正负电子对的产生,他明确肯定自己观测到了一种新粒子,即正电子。安德孙为此获得了诺贝尔物理学奖。

后来,物理学家又在实验中观测到了反质子、反中子。反质子与质子质量相同,但带负电。反中子与中子性质也相似,只不过磁矩相反。科学家认为,反质子与反中子可以构成“反核”,正电子围着转,就成为了“反原子”。这就是所谓的“反物质”。现在在实验中已经观测到了“反氢原子”,其他反物质原子尚未发现,但学术界一般不怀疑其存在。

要注意,反物质与我们通常的物质都带正能量,当然质量也是正的。需要强调的是,正物质与反物质相遇会发生猛烈爆炸而湮灭,成为光子。

奇怪的是,宇宙中的物质几乎都是“正物质”,反物质的存在微乎其微。为什么会这样?这是一个至今未能得到满意解答的问题。

我们看到,反物质首先是从相对论的角度预言的。反物质的研究和发现,既要用到量子论,也要用到相对论。

6. 开拓相对论的人们

相对论获得公认之后,一些人注意到,在相对论的发展过程中,许多人都有贡献。

在相对论诞生之前,洛伦兹提出了洛伦兹收缩和洛伦兹变换,洛伦兹变换正是相对论的核心公式。洛伦兹还给出了电子质量公式。

庞加莱首先正确阐述了相对性原理，一直坚持认为相对性原理不应放弃。他猜测真空中的光速是一个常数，而且光速很可能是极限速度。他还建议通过“约定”（即“规定”）光速来校准不同地点的钟，使它们同时、同步。

显然，洛伦兹和庞加莱都对相对论的诞生做了重要的铺垫工作。

实际上，做出贡献的还不仅是他们。洛伦兹是在 1892 年提出“洛伦兹收缩”的，但最早提出这一公式的是爱尔兰物理学家斐兹杰惹。他声称自己早就在课堂教学中给出了这一公式，早于洛伦兹。他的学生们都力证这一点。但当时看到的他公开这一公式的文章发表在 1893 年，晚于洛伦兹。斐兹杰惹去世后，他的学生为了给老师讨还公道，四处搜寻证据。他们想到老师以前曾给英国的《科学》杂志（不是美国的《科学》杂志）写过一封信，谈到这一收缩公式。但信寄出不久，这一杂志就倒闭了，斐兹杰惹以为该杂志没有来得及刊登这封信，也就没有强调这一证据。他去世后，那些忠实的学生们终于发现，该杂志在倒闭前的倒数第二期上，刊登了这封信。那期杂志发表在 1889 年，早于洛伦兹的论文。所以，现在人们把洛伦兹收缩称为洛伦兹—斐兹杰惹收缩，有人还建议应该称作斐兹杰惹—洛伦兹收缩，因为斐兹杰惹发现这一公式比洛伦兹早。

最早给出洛伦兹变换的也不是洛伦兹本人。1887 年佛格特就给出了一个类似的变换，但各项都差了一个因子$\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}$。

1898 年，拉摩首先给出了洛伦兹变换的正确公式。据说斐兹杰惹也早于洛伦兹得到这一变换。洛伦兹本人则是在 1904 年才给出这一变换的。

但必须承认，无论是洛伦兹收缩还是洛伦兹变换，提出较为完整的理论（虽然有错误）并造成最大学术影响的还是洛伦兹本人。

庞加莱对爱因斯坦的影响是巨大的。爱因斯坦在“奥林匹亚科学院”时期就曾阅读过庞加莱的《科学与假设》等著作。在爱因斯坦建立相对论的文章中，不难发现庞加莱的影响。

然而真正完成思想突破，构建起相对论的人只有爱因斯坦一个人。

7. 爱因斯坦是相对论的唯一创建者

洛伦兹坚信绝对空间和以太，主张放弃相对性原理。庞加莱否认绝对空间的存在，坚持相对性原理，但他仍抱住以太理论不放。承认“以太”，实质上还是承认绝对空间，“以太”本身就是“绝对空间”的实体。

只有爱因斯坦一个人，不仅抛弃“绝对空间”，也抛弃“以太”。所以，只有爱因斯坦最彻底地坚持了相对性原理。这一点，是他深受马赫影响的结果。马赫认为，凡是看不见摸不着的东西，都不能承认其存在，他认为既不存在绝对空间，也不存在以太。马赫的观点深刻地影响着爱因斯坦，引导他走向了狭义相对论的创建之路，后来又引导他创建了广义相对论。

我们要特别提出的是，爱因斯坦与包括洛伦兹、庞加莱在内的所有学者的最大不同是，他提出了“光速不变原理”。由于发现这一原理，他终于认识到“同时”不是一个绝对的概念，而是一个“相对”的概念。在作相对运动的不同惯性系中，“同时”不是绝对的，而是相对的。一个惯性系中同时发生的异地事件，在另一个相对于它运动的惯性系中看就不是“同时”发生的。

爱因斯坦认为，相对论与牛顿物理学的分水岭，不是“相对性原理”，而是“光速不变原理”。“光速不变原理”直接导致了“同时的相对性”。“同时的相对性”是相对论的核心观念，也是最难让人弄懂的概念。

爱因斯坦是“光速不变原理”及其推论“同时相对性”的唯一发现者。

洛伦兹不承认相对论是自己的理论。他最初反对相对论，后来才慢慢承认了相对论的正确性。

庞加莱则至死都没有承认相对论的正确。爱因斯坦刚提出相对论时，曾经指望得到数学大师庞加莱的支持。他在一次索尔维会议上见到了庞加莱（这是这两位伟人的唯一一次见面，不久庞加莱就去世了）。开完会回来后，爱因斯坦很沮丧，对他的朋友说，“庞加莱根本不懂相对论”。看来庞加莱没有赞同他的理论。

后来，苏黎世大学准备聘请爱因斯坦当教授，写信征求庞加莱的意见，庞加莱回复说：“爱因斯坦先生是我所知道的最有创造思想的人物之一，尽管他还很年轻，但已经在当代第一流科学家中享有崇高的地位……不过，我想说，并不是他的所有期待都能在实验可能的时候经得住检验。相反，因为他在不同方向上摸索，我们应该想到他所走的路，大多数都是死胡同；不过，我们同时也应该希望，他所指出的方向中会有一个是正确的，这就足够了。”后来的研究表明，历史与这位数学大师开了一个极大的玩笑：爱因斯坦在1905年指出的所有方向都是正确的。

深深影响过爱因斯坦的马赫，曾受到爱因斯坦的高度评价，但他也没有支持相对论。当时马赫还活着，他听到爱因斯坦的工作后，表示“爱因斯坦的相对论和我的思想毫无共同之处，我断然拒绝他的相对论。”真是大煞风景。不久之后，马赫就去世了。

综上所述，我们看到，虽然有很多人做了许多前期贡献，但爱因斯坦是相对论的唯一创建者。

对于这种情况，杨振宁先生曾有过精彩的评价：

“洛伦兹只有近距离眼光，没有远距离的眼光；庞加莱只有远距离的眼光，没有近距离的眼光；只有爱因斯坦具有自由的眼光，既近距离又远距离观察问题。”所以爱因斯坦成为了相对论的唯一创建者。

第二篇
爱因斯坦与广义相对论





第六章　探寻天体运行之谜

“相对论”取得了伟大的成功，但也存在严重的困难。爱因斯坦发现，万有引力定律与相对论冲突。为了解决这一问题，爱因斯坦奋斗了10年，终于作出了他一生中最重大的发现。他发现万有引力与一般的“力”有本质区别，它不是我们通常所说的力，而是一种几何效应，是时空弯曲的表现。

爱因斯坦于1915年建立起描述“弯曲时空”的理论。他把新理论看作原有“相对论”的发展与推广，所以把新理论称为“广义相对论”，而把原来的相对论称为“狭义相对论”。

广义相对论研究时空弯曲，也就是研究万有引力。因此，广义相对论也可以看作万有引力定律的推广。

为了使读者更好地理解广义相对论，更清楚地看到科学研究的艰难历程，我们先来回顾一下万有引力定律的建立过程。

1. 从“中心火”到“地心说”

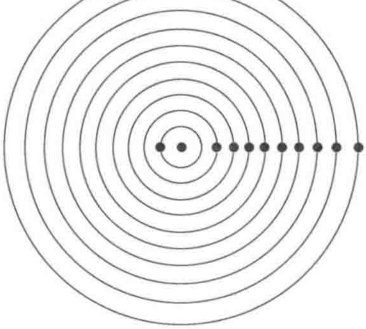
公元前584年5月28日，希腊地区发生了日

全食。令希腊人感到震惊的不仅是这可怕的天象,最使他们吃惊的是,他们的一位同胞泰勒斯,居然事前就预言了日全食的出现。

泰勒斯是一位天文学家,同时也是一位数学家。他最早证明了“等腰三角形的两个底角相等”“直径上的圆周角是直角”等几何定理。泰勒斯曾在两河流域(即现今伊拉克、叙利亚那块地方)学习过数学和天文学。那里是人类文明的最早发源地,文明的出现比古埃及还要早一些。

泰勒斯有一位学生叫毕达哥拉斯。我们都知道毕达哥拉斯这个名字,因为他最早发现了我们称之为“勾股定理”的那个几何定理。这里我们主要谈一下他对天文学的重大贡献。

毕达哥拉斯提出了第一个“科学的”宇宙模型(图6-1)。他认为大地是一个球,最早提出了“地球”这个概念。他进而又认为宇宙也应该是球形的。他认为火是最圣洁的东西,所以宇宙的中心应该是火,他称之为“中心火”。毕达哥拉斯认为地球、太阳、月亮和行星分别镶在一个个透明的天球



中央为中心火,从内到外分别为对地、地球、月亮、太阳、水星、金星、火星、木星、土星和恒星天

图6-1 中心火模型

上,随天球一起围绕“中心火”转动。按照他的见解,这些天球分别是“地球天”“月亮天”“太阳天”“水星天”“金星天”“火星天”“木星天”“土星天”“恒星天”等,一共有9个。但毕达哥拉斯是一位哲学家兼数学家,他认为9这

个数字不够完美，完美的数字应该是10。所以，他大胆设想还应该有一个天体存在，他把这个天体命名为“对地”。“对地”位于“中心火”的另一侧，与地球遥遥相对，也镶在一个透明天球上。这样，围绕“中心火”的天球就成了10个。但是人们为什么没有看见过“对地”和“中心火”呢，他认为人类生活在地球的背对“中心火”的一面，所以人类不可能看见“中心火”，也不可能看见“对地”。

当时的希腊正处在“战国时代”，伴随着刀光剑影，在学术上也出现了“百花齐放”与“百家争鸣”的局面。那是一个不断产生伟人和伟大思想的时代。

200多年后，即公元前300多年，希腊的另一位伟人亚里士多德提出，看不见、摸不着的东西都不应该相信其存在。谁见过“中心火”？谁见过“对地”？他认为这些东西都不存在。于是他对毕达哥拉斯的宇宙模型做了根本性的改造，提出了“地心说”(参见图2-6)。

亚里士多德认为，我们看见诸星围绕我们转，所以我们的地球应该位于宇宙的中心。其他天体依然像毕达哥拉斯设想的那样，镶在各自的透明天球上。他认为离我们最近的是“月亮天”，其次是太阳天、水星天、金星天、火星天、木星天和土星天。再外面有一个恒星天，所有的恒星都镶在这个天球上。最外面还有一个水晶天，又称原动天，那里生活着一位“第一推动者”，也就是后来所说的“上帝”。这位“第一推动者”，推动恒星天转动，恒星天带动土星天，进而带动木星天……于是，所有的天体都围着我们的地球转动。由于人类是上帝最杰出也最珍爱的作品，所以上帝特别关照人类，不但让所有天球都围绕地球转，而且让所有的星星都对着我们闪闪发光。

亚里士多德把高度比月亮天低的区域称为“月下世界”，高度比月亮天高的区域称为“月上世界”。他认为月下世界的东西由土、水、火、气四种元素组成。月下世界的万物都是不高级的，可以衰败腐朽的。而月上世界则是高级的，永恒不变的，那里充满轻而透明的“以太”。亚里士多德的“以太”观念深刻地影响着人类的认识，一直影响到近代光学的波动说。前面谈过，人们长期误认为光是以太的弹性振动。

亚里士多德的地心说后来被托勒密(公元100多年)进一步发展，用以定

量地描述行星在天空中的视运动轨迹。这个学说后来得到天主教会的支持,得以广泛传播,统治人类的思想达 1000 多年。

2. 震撼人类的“日心说”

托勒密为了使地心说能够比较精确地描述行星在天空中的视运动,设计了复杂的本轮、均轮系统,其中尤以描述水星和金星运动的本轮、均轮结构最为复杂(这两颗星在天文学上称为内行星,它们比地球距离太阳近)。

到了 15 世纪,人们认识到,如果认为水星和金星不是直接围绕地球转,而是绕着太阳转,太阳再带着它们一起围绕着地球转,那么,描述它们在天空中的视运动就简单多了。于是有人提出了修改的地心说(图 6-2)。这一学说认为,水星和金星围绕太阳转,太阳(带着水星和金星)、月亮和其他的行星则分别围绕地球转。

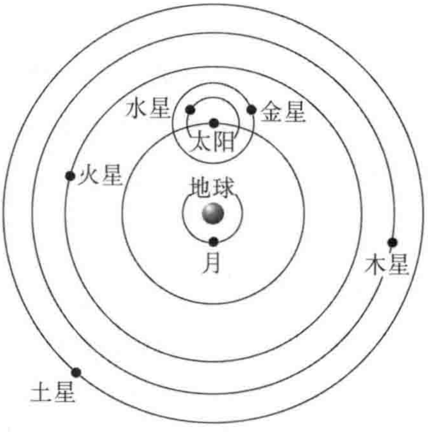


图 6-2　修改后的地心说

波兰天文学家哥白尼首先对地心说产生了根本性的怀疑。哥白尼知道改进后的地心说,觉得这一改进虽然对简化托勒密的学说有作用,但在解释天象上依然过于复杂。

哥白尼还知道古希腊有过日心说。公元前 200 多年,古希腊学者阿里斯

塔克就曾提出太阳位于宇宙的中心，诸星都围绕太阳转动的观点，但没有什么人能理解这一超前于时代的思想。后来，托勒密发展了地心说，用它来定量地描述太阳、月亮和行星在天空的视运动。天主教诞生后，托勒密学说又为教会所采纳，得以广泛流传。后人几乎完全忘却了阿里斯塔克的日心说。

哥白尼注意到毕达哥拉斯的中心火模型。经过长时间思考后，他的思想产生了一次伟大的飞跃：他想，毕达哥拉斯认为火是最圣洁的东西，应该位于宇宙的中心，太阳不就是一个大火球吗？太阳会不会就相当于“中心火”，位于宇宙的中心呢？他回忆起了阿里斯塔克的日心说，以及修改后的地心说。哥白尼经过仔细思考，发现如果认为太阳位于宇宙的中心（图 6 - 3），描述星体在天空中的视运动规律就简单多了，一切疑问都会迎刃而解。

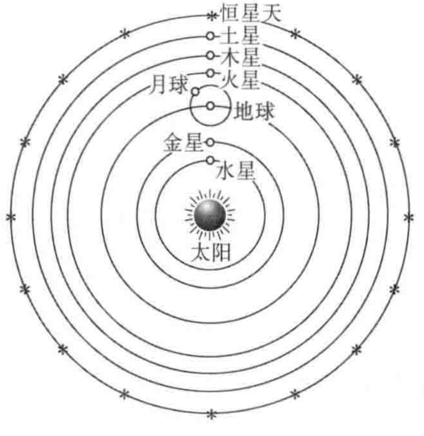


图 6 - 3　哥白尼的日心说

哥白尼是一位教士，他知道日心说与教会的观点相抵触，他的朋友们也劝告他，此事非同小可，不要乱说。哥白尼把自己的日心说理论悄悄写成一本叫作《天体运行论》的书，但一直不敢公开发表。直到临死前，才出版了这本划时代的伟大著作。

哥白尼是在战战兢兢中出版这本书的，出版商也顾虑不小。

哥白尼其实是一位虔诚的天主教徒，根本没有反教会的想法。为了表白自己的忠心，他在书的扉页上写道：“谨将本书献给最神圣的教主——保

罗三世教皇陛下”。在书的前言中,他还说,“书中表达的思想纯属猜测,只是一种数学练习,而不是对真实世界的描述”(有人认为这段话是出版商害怕教会迫害而背着哥白尼加上去的)。

哥白尼还试图把反教会的罪名推给地心说的鼓吹者。他在《天体运行论》的第一卷中写道:“我对地心说进行了长期思考,上帝为我们创造了美好而协调的宇宙,哲学家们(指地心说的提出和拥护者)却不能提出正确的理论来描述,对此我感到十分气愤……因此,我不得不去阅读更多的哲学著作,看看有没有与传统理论(地心说)不同的假说。终于,我在古希腊的一些著作中发现了地球运动的观点。这就启发我也来运用这种观点……我终于发现,如果认为地球和行星都围绕太阳运动,一切就变得简单而清楚了。”

这本书在他即将去世时出版了。刚开始,教会没有意识到日心说对自己的不利,没有禁止这本书的传播。不久后,教会渐渐感觉到了这本书对自己的威胁,于是下令禁止这本书的出版和流行。但是,哥白尼的观点已经在社会上流传开了。

有一些日心说的拥护者继续在暗地里传播这一理论,但很少有人敢公开宣传哥白尼的观点。

3. 布鲁诺与无限的宇宙

这时,意大利出现了一位勇敢的斗士,叫布鲁诺。他不是天文学家,只是一位神学院的学生。他从内部知道了教会的很多黑暗内幕,觉得许多主教和神父非常虚伪,在公开场合道貌岸然,背地里却什么坏事都干。布鲁诺对此十分反感,进而认为教会的一切宣传都是谬论。他一看到哥白尼的日心说就大喜过望,如获至宝,于是到处宣传日心说。

布鲁诺还进一步发展哥白尼的观点。哥白尼只不过把地球和太阳调换了一下位置,把太阳放在了宇宙的中心。地球、月亮和行星仍然分别镶在各自的透明天球上,此外还有一个恒星天,这些天球都围绕太阳转动。恒星天之外依

然存在上帝生活的原动天，上帝在那里推动天球转动。布鲁诺则认为恒星都是遥远的太阳，宇宙根本没有中心，宇宙是无限的。这样一来，他把上帝生活的位置弄没了，上帝生活在哪里呢？他的观点给教会造成了巨大威胁。

布鲁诺口才十分好，是一位雄辩家，几乎没有人能辩过他。有一次，一位教士问他，“宇宙怎么可能是无限的呢？”这个问题确实很难回答。但布鲁诺没有正面回答，而是巧妙地反问，“宇宙怎么可能是有限的呢？”这个问题同样也难以回答。

总之，布鲁诺给教会造成了很大麻烦。教会到处追捕他，终于在他 50 岁的时候抓住了他，把他判处火刑，并告诉他，如果他认罪，表示忏悔，可以不处死他。但他高傲地回答：“我愿作为一个烈士而死去。”“其实，你们心里比我更恐惧！”

布鲁诺勇敢地走向了火刑架。

哥白尼的日心说在人类历史上意义重大。一般认为，现代自然科学的诞生，就是以日心说的提出为标志的。

4. 伽利略、惠更斯与土星的光环

伽利略相信日心说，他也因此付出了代价。

伽利略在听说荷兰有人发明了望远镜之后，马上利用自己的光学知识设计了天文望远镜（图 6－4）。他用望远镜去看星空，发现那淡淡的银河原来是由许多恒星组成的，他看见了太阳上的黑子和月亮上的环形山（图 6－5），还发现木星有 4 颗卫星（图 6－6）。

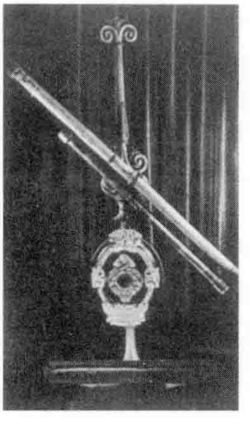


图 6－4　伽利略自制的望远镜

教会的拥护者愤怒了，伽利略怎么能偷看上帝的秘密呢？上帝创造的光芒万丈的太阳怎么可能有黑点呢？光洁如镜的月亮怎么会凹凸不平呢？有人认为这肯定是望远镜上的玻璃造成的幻像，不信你把玻璃去

掉,这些幻像就看不见了。

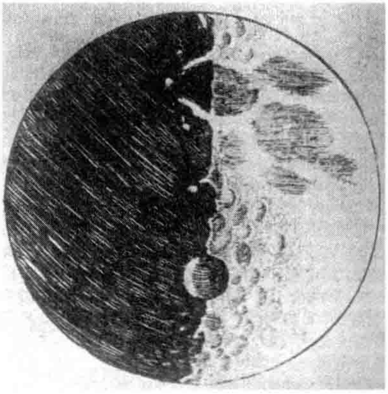


图 6-5 伽利略看到的月面环形山

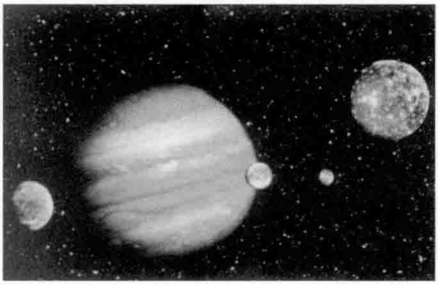


图 6-6 木星的 4 颗卫星

伽利略当然也为自己的发现感到震惊,同时也感到兴奋。特别是木星居然有卫星,俨然像一个小太阳系。他觉得,看来哥白尼的日心说确实是对的。

最有趣的是他发现了土星的光环。不过由于望远镜倍数太低,他没有看清那是“光环”,只是觉得土星的两侧似乎各有 1 颗星,土星似乎是 3 颗!那时人们认为土星是离我们最远的行星,称其为“最高的行星”。他为这一重大发现感到惊喜,但又怕搞错了弄成笑话。好在当时有一种流行的保证发明权的方法。那就是把科学发现用拉丁文写成一句话,然后把字母顺序打乱,还可以再多插入两三个字母,或去掉一些字母,使之成为“秘语”。先公布秘语,等自己确认了发现正确后,再把秘语解密。如果后来表明该发现是错误的,就不解码秘语,别人也不知道你犯了什么错误。如果自己解密前别人作出了此项发现,你可以把秘语解密,证明自己对这一发现拥有优先权。

于是,伽利略制作了一段秘语,公布了出来。秘语如下:

Smaismrmielmepoetaleumibuvnenugttaviras

这种秘语很难解开,一般来说很少有人会去作解密的尝试。但这时有一个

人对此秘语非常感兴趣，他急于知道伽利略究竟发现了什么。这个人就是德国科学家开普勒。

开普勒有一个奇怪的想法，他认为上帝不会随便创造宇宙，一定有一个安排。他知道伽利略发现了木星有 4 颗卫星。他想，地球只有 1 颗卫星，木星有 4 颗，那么到太阳的距离介于地球和木星之间的火星有几颗呢？他认为上帝不会随便安排，从数学角度看，似乎上帝会给火星安排两颗卫星。伽利略一定是看到了火星有两颗卫星！这段秘语很可能就是表达这一发现的！

于是，他茶余饭后就去琢磨这段秘密，经过反复尝试，在去掉两个字母后，终于把秘语凑成了一句话：

Salve, umbistineum geminatum Martia proles.

这句话是，"向你致敬，火星产生的双生子"。开普勒高兴极了，他知道了伽利略的发现，也证实了自己对火星卫星数目的猜测，上帝真的是一位数学家！

过了一段时间，伽利略确认自己的发现无误后，公布了秘语的谜底（他也去掉了两个字母）。内容是"我看见最高的行星有 3 颗"：

Altissimum planetam tergeminum observavi.

开普勒算是白费了力气。现在我们知道木星的卫星不是 4 颗，而是 60 多颗。但火星的卫星确实是两颗，这一点开普勒算是猜对了。不过，此时伽利略还是没有认识到自己看见的东西是土星的光环，他一直误认为土星由 3 颗星组成。

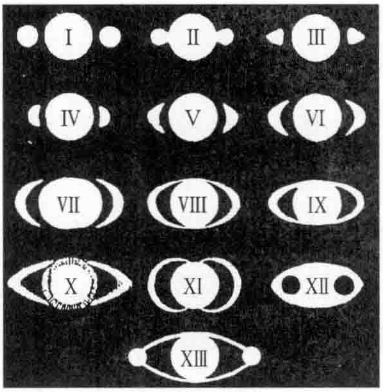
50 年后，荷兰天文学家惠更斯看清了土星的光环。他起先也不敢确认这一发现，也是先公布了一段秘密：

Aaaaaaa, ccccc, d, eeeee, g, h, iiiiiii, llll, mm, nnnnnnnnn, oooo, pp, q, rr, s, ttttt, uuuuu

3 年后，他确认了自己的发现，公布了谜底：

Annulo cingitur, tenui, plano, nusquam cohaerente, ad eclipticam inclinato

即"有环围绕，薄而平，处处不相接触，与黄道斜交"。



历史上的土星图

图 6－7　土星光环的发现

土星不断地跟人类开玩笑。伽利略和惠更斯看到光环时，光环的盘面对着地球。过了一段时间，盘面转过去了，盘的边缘朝向了地球。由于盘很薄，人们看不见盘了。土星的光环消失了！这一消息不胫而走，真是太奇怪了。有的媒体开始炒作：“土星的光环破碎了！”“碎片正飞向地球！”

好在不久后，盘面又转过来了，人们又看见了光环，谣言当然也不攻自破。

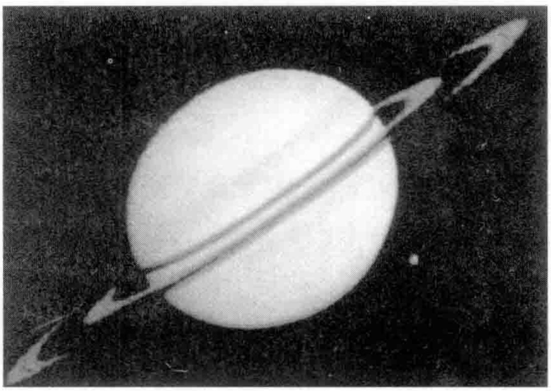


图 6－8　今天看到的土星光环

5. 伟人的认罪声明

木星卫星的发现，更坚定了伽利略对日心说的信仰。他曾尝试宣传哥白尼的观点，但立刻受到朋友和同事的警告。哥白尼与布鲁诺的前车之鉴，使伽利略暂时放弃了宣传日心说的想法。

后来，一位担任红衣主教的朋友当上了教皇，伽利略想，这下子行了，估计自己不会受到迫害了，于是他开始宣传日心说，在自己的著作和日常谈话

中传播哥白尼的理论。没有想到教会中反对日心说的力量是如此强大,当上了教皇的朋友也救不了他。教会勒令他到宗教裁判所报到。伽利略的学生和朋友去给他说情,说他已经是 70 岁的老人了,体弱多病,是不是就不要审判他了。教会说不行,他必须到宗教裁判所报到,如果不主动来,就把他抓来。伽利略只好躺在担架上,由朋友和学生抬进了宗教法庭。

他被迫作了如下的认罪声明:

"我,伽利累·伽利略,佛罗伦萨人温森基奥·伽利略的儿子,70 岁。我个人被带来受审,跪在您,最杰出最尊敬的红衣主教和全世界基督教国家反对异端堕落的宗教法庭庭长面前,面对着福音书,用我自己的手按着它宣誓:我一直相信,并且在上帝的帮助下将来也相信罗马天主教圣公会所主张、训导和传布的每一条教义。总之,因为我已接受宗教法庭的命令,完全放弃我认为太阳是中心并且不动这一虚妄的观点,决不以任何方式坚持、辩解和教授上述荒诞无稽的学说……我希望从阁下您和每个天主教徒的头脑中,消除对我当然抱有的强烈怀疑。因此,我以一颗真诚的心和诚实的信用,发誓公开放弃、诅咒并嫌恶上述的谬见和异端邪说,乃至其他一切反对教会的异端邪说;我还发誓,将来无论在口头上或文字上决不说也决不主张任何可能对我产生类似怀疑的话;此外,如果我知道任何人是异教徒或怀疑任何人是异教徒的话,我一定向宗教法庭或向当地宗教法庭法官和大主教检举告发。而且我发誓并保证,我一定履行并完全遵守宗教法庭现在或将来加诸于我的全部赎罪苦行。我对我上述保证、誓言和声明若有丝毫违背(天亦厌之!),我甘受神圣的法典和其他针对这种罪过的一般法令与专门法令对我判决宣布的刑罚惩处。我的的确确按着我手中的福音书发誓,我,上面报过姓名的伽利略,已经像上面所说的那样公开弃绝邪恶,并保证约束自己,作为其证据,这是我亲手在这份誓绝书上的签名画押,我当众逐字逐句地宣读了它。"

后来有人说,他发表完这一声明后,嘟嘟囔囔地说了一句:"可是地球仍然在转动啊。"但这不是真的。当时伽利略一句话也没有说,两只无神的眼

睛一直盯着一只误入法庭的小狗,那只可怜的小狗一直在摇着尾巴。



图6-9 伽利略受审

可以想象,在当时的社会背景下,伽利略如果坚持不认错的话会有什么遭遇。

伽利略是一位忠实的天主教徒,他相信上帝,并不反对天主教会,他一直表白这一点,但教会仍然不能容忍他对真理的追求。

伽利略从此被监禁起来。他双目失明,不再有自由。但老伽利略并未真正屈服,在软禁期间他在荷兰出版了《两门新科学》这本名著。

由于教会的残酷压制,科学的中心从此转移出了意大利,转到教会控制较弱的地区去了。

6. 傲慢失鼻的第谷

在介绍开普勒之前我们先简单谈一下他的老师第谷。丹麦天文学家第谷是与哥白尼同时代的人,但他不赞成哥白尼的日心说,提出修改了的地心说。按照这一学说,地球是宇宙的中心,但金、木、水、火、土五颗行星不是直接围绕地球转动,而是围绕太阳转,太阳再带着它们一起围绕地球转(图6-10)。

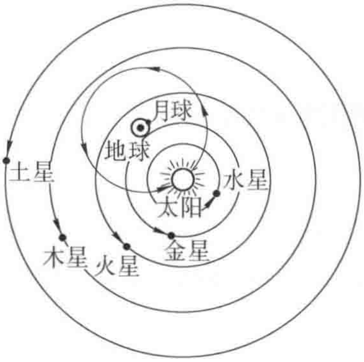


图 6-10　第谷修改后的地心说

第谷为人高傲,经常与人发生争执,有时还弄得很激烈。在一次因争执引起的决斗中,他被人一剑削掉了鼻子,后来只好做了一个金银合金的假鼻子安上。

他鼻子虽然不好,眼睛却十分灵光。他肉眼观测天象(当时尚无望远镜)的精度是哥白尼的 20 倍。他发现了一颗新星,那是在本来没有恒星的位置突然出现的亮星,他认识到新星出现在"月上世界"。他还发现彗星的轨道与行星不同,是很扁的椭圆,因此彗星轨道必将穿破各行星所在的透明天球。这样一来,亚里士多德关于"月上世界"永恒不变的说法就变得令人怀疑了。

丹麦国王腓特烈二世很大度,能够容忍第谷的傲慢。他听说德国皇帝想邀请第谷去德国工作,赶忙给他建了一座当时世界上最好的天文台,盛情挽留他。这样,第谷一直在丹麦工作了 20 年,积累了大量精确的观测资料。

腓特烈二世去世后,他的儿子即位。新国王可没有父亲那么大度,他感到难以容忍第谷的高傲。德国皇帝听说后,赶快去"挖"第谷,德国终于获得了这个世界第一流的人才。

第谷在德国生活的时间不长,工作了 4 年就去世了。他在德国的关键收获是得到了开普勒这名学生。在去德国前,第谷就已听说过开普勒的名字,

对他的研究工作十分赞赏，这次居然有幸获得了这位前途看好的学生。

7. 开普勒与正多面体宇宙

开普勒从小体弱多病，得过天花，手脚都有残疾，视力也不大好。视力不好对于研究天文学肯定是一个缺陷。但是开普勒脑子非常好，学习和工作都十分勤奋，有很高的数学水平。

他上中学时，教天文学的老师相信日心说。这位老师在课堂上按教会的旨意讲授地心说，私下里则对开普勒等几个喜好天文的学生讲，在他看来还是日心说更为正确。从此，日心说就在开普勒的头脑中扎下了根。

开普勒很爱想问题。他常常想，上帝是万能的，他不会随便创造宇宙。上帝在创世的时候，一定有自己的设计方案。开普勒猜测上帝一定想过如何安排各行星到太阳的距离，因此各行星到太阳的距离很可能会有一个规律，开普勒反复琢磨这个规律。他突然想到，几何学上已经证明正多面体只有 5 种(图 6 - 11)，天文学则表明，行星只有 6 颗(金、木、水、火、土 5 颗再加上地球)，5 和 6 数字很相近，正多面体和行星之间是否有某种关系呢？这个想法真是太有趣了。经过反复研究，他终于找到一个规律：各行星到太阳的距离“确实”与五种正多面体有关。他得到一个宇宙模型——正多面体宇宙模型(图 6 - 12)。

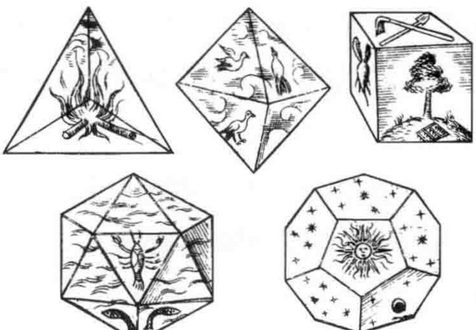


图 6 - 11　五种正多面体

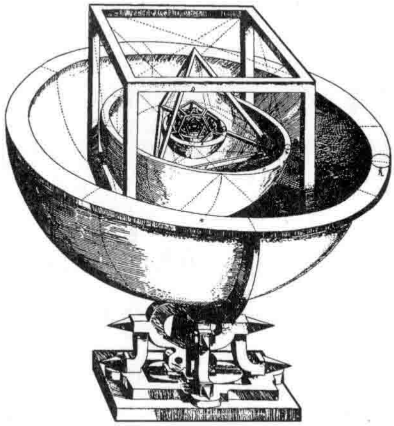


图 6-12　开普勒的正多面体宇宙模型

开普勒发现：

如果把土星轨道画在一个正6面体的外接球上，那么木星轨道就恰在此6面体的内切球上；

如果把这个6面体的内切球看作一个正4面体的外接球，那么火星轨道就在此4面体的内切球上；

如果把这个4面体的内切球看作一个正12面体的外接球，那么地球轨道就在此12面体的内切球上；

如果把这个12面体的内切球看作一个正20面体的外接球，那么金星轨道就在此20面体的内切球上；

如果把这个20面体的内切球看作一个正8面体的外接球，那么水星轨道就在此8面体的内切球上。

开普勒高兴极了，他发现了上帝创造宇宙时的思路，上帝真的是一位几何学家！开普勒为宇宙结构找到了神学依据！

8. 幸遇恩师

他把自己的发现写在《宇宙的秘密》一书中。这本书出版后，学术界评

价很高。伽利略和第谷都非常赞赏。第谷到德国后，就邀请开普勒到他所在的布拉格天文台工作。

开普勒对于能结识第谷这位老师十分高兴。不过，到了第谷身边，查阅了第谷的精确观测资料后，开普勒沮丧地发现，自己的“正多面体宇宙模型”错了。

但是，开普勒还是为自己能找到第谷这样的老师而高兴，遗憾的是，第谷不久就去世了。他在去世前，把自己的全部观测资料留给了开普勒。第谷希望自己没有虚度此生，他认识到开普勒是自己最好的继承人。他叮嘱开普勒：一定要尊重观测的事实。第谷认为哥白尼的日心说不对，正确的是经过自己修改的地心说。他要求开普勒在运用自己的观测资料时，一定要采用修改后的地心说，不要用日心说。他还对开普勒说，自己在最困难的时候得到德国皇帝鲁道夫的接待和帮助，一直心存感激。他想要精确观测1000颗恒星的位置，制订一份以鲁道夫名字命名的星表，以表示感谢。他已经观测了700多颗恒星，希望开普勒今后继续这一工作，完成对1000颗恒星的观测，并最终出版《鲁道夫星表》。

9. 无心插柳柳成荫

开普勒答应了老师的要求。他牢记老师的遗嘱，继续勤奋地工作。在观测和研究中，他发现火星在天空中出现的位置和理论计算有8分的偏差。他反复计算、琢磨，消耗了不少时间，却怎么也消除不了这8分偏差。别人劝他：算了，不就8分偏差吗？这点偏差算不了什么，不会影响大局。但是开普勒牢记老师的教导，“一定要尊重观测事实”，他抓住这8分偏差不放手。有一天，他突然想到，行星的轨道会不会不是正圆啊？把天球想象成正圆会不会有问题啊？他运用自己精湛的几何知识，立刻发现，如果火星的轨道不是正圆，而是椭圆，这8分的偏差就消失了。

开普勒得到了行星运动的两条重要定律：

第一定律:行星绕日的轨道是一个椭圆,太阳位于椭圆的一个焦点上。

第二定律:行星的矢径在单位时间内扫过的面积相等。

矢径,就是太阳到行星的连线。

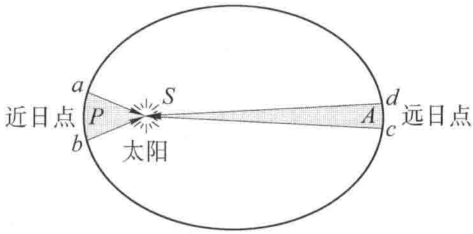


图 6－13　开普勒行星运动定律

这两条定律简单而神奇。笔者在上大学前在一篇科普文章中看到这两条定律时,感到十分神奇。特别是第二定律,为什么扫过的面积会相等呢?上大学后才知道,这是角动量守恒定律的表现。中学生都知道能量守恒定律和动量守恒定律,其实还有一条同样重要的守恒定律——角动量守恒定律。

10. 多难不屈的精英

开普勒当时已经穷困潦倒。鲁道夫皇帝在政变中被推翻了。新皇帝不重视科学,也不重视开普勒。他虽然是宫廷天文学家,却拿不到薪金,新皇帝居然拖欠工资,而且一拖就是好多年。

幸亏开普勒的夫人是一位富有的寡妇,给他带来不少财富。但是拖欠工资的时间太长了,夫人带来的钱越用越少。夫人的怨言也越来越多。开普勒也感到自己实在对不起夫人和孩子们。

现在,终于有了成就了,开普勒看到了希望。他的夫人虽然不懂天文学,但明白丈夫作出了大成就,也高兴了起来。然而,整个社会却以沉默回答了他们。没有任何人对开普勒的成就表示祝贺,更不用说给钱了。开普勒与伽利略关系不错,伽利略还送过他一架望远镜。他们两人都是制作和

使用天文望远镜的鼻祖。伽利略的望远镜是用一个凸透镜和一个凹透镜组成的，开普勒则把它改进为由两个凸透镜组成。伽利略遭到迫害时，开普勒曾经写信鼓励过他。现在开普勒需要鼓励了，却没有人理他，连伽利略也没有来信。

开普勒失望极了。他想干脆出一本书，把自己的成果刊登出来，传播一下。他刚把书写完，第谷的女婿就找上门来了。他对开普勒说，你的书用了我岳父的观测资料，我对这些资料有最正当的继承权。你出这本书，作者名字必须把我也署上。开普勒不同意，两人就争吵起来。第谷的女婿又说，你答应过我岳父，你的研究工作要用他的地心说，你为什么要用日心说？必须改过来！这样一来，书的出版就遇到了困难。4 年后，双方终于达成妥协：开普勒可以单独署名出这本书，但是第谷的女婿要在书中写一篇序言。他在这篇序言中说：本书作者开普勒不是个东西，他背叛了他的老师……这本奇妙的书就这样出版了。不管怎么说，开普勒的行星运动第一、第二定律总算公之于世了。

11. 有意栽花花绽放

开普勒的命运并没有就此好转。他依然没有拿到工资。夫人和心爱的小女儿相继去世。德国的政局越来越乱，大城市住不下去了，开普勒躲到多瑙河畔的小城林茨，那里比较安静。

此时的开普勒更加穷困潦倒，但林茨的老百姓知道他是一位了不起的学者，有 11 个女孩子来提亲。开普勒最后选择了一位木匠的女儿。这个女孩子家庭虽然贫困，但“穷人的孩子早当家”，她本人十分能干，把家料理得不错，对开普勒也很体贴，使开普勒在贫困的条件下得以继续自己喜爱的科学研究。

他虽然发现了行星运动的两条定律，但那不是他的目标，他想要找的是行星到太阳距离的规律，这条规律还没有找到。正是“有意栽花花不放，无

心插柳柳成荫”。

开普勒夜以继日地工作着、探索着。功夫不负有心人。在一个不眠之夜以后，他的夫人走进了他工作的房间，拉开了窗帘，黎明的曙光照了进来。开普勒突然从椅子上跳起来，抱住他的夫人大叫，“亲爱的，宇宙是和谐的，正像我们和谐的家庭一样！”开普勒发现了他朝思暮想、顽强寻找的规律，这就是开普勒第三定律：

行星运动周期的平方，与椭圆轨道半长轴的立方成正比。

开普勒终于找到了各行星到太阳的距离的规律，这个规律比他原来猜想的要复杂一些。开普勒非常兴奋，上帝的确是一位几何学家。

12. 运交华盖的开普勒

开普勒的科研目标达到了。他又想起了老师第谷的遗嘱，全力以赴地去完成《鲁道夫星表》。经过辛劳的观测，他终于在老师工作的基础上，完成了对 1000 颗恒星的观测，完成了《鲁道夫星表》。这个星表对天文学和航海学作出了巨大贡献，被天文学家和航海家用了 100 多年。

开普勒把这个星表献给皇帝，皇帝依然没有给他工资。家里已经揭不开锅了。开普勒悲愤至极，他决定停止自己的工作，去向政府讨回拖欠的工资。

临行前，开普勒把全家集合到一起，对大家说：“我辛劳了一生，总算有所成就。可是我没有面包来养活你们。我一生的研究就到此为止，明天我就去向政府讨回他们拖欠我的 20 多年工资。他们总不能等到我死后才还钱吧？我去几天就回来。”他又对自己最信任的大女婿说：“孩子，这是我写的两句诗，万一我回不来了，就把它刻在我的墓碑上。”

三天后，贫病交加又突患伤寒的开普勒，躺在位于讨债路上的一个小旅店里，没有任何亲人在身边，他是在孤独、饥饿和高烧中离开这个世界的，这个对他极为不公的世界。这一天是 1630 年的 11 月 15 日。开普勒的墓碑上

刻着他自己写的那两句诗：

我欲测天高，如今又量地深。

上天赐予我灵魂，大地收容我的俗身。

哥白尼和他的追随者们催升了科学的朝霞。他们在黎明前的黑暗中逝去，而他们企盼的光明终于到来。

伟大的先行者是要付出代价的，但后人不会忘记他们的丰功伟绩。

第七章　万有引力与牛顿的苹果

1. 万有引力定律的发现

开普勒提出的行星运动三定律，为万有引力规律的探索打下了数学基础和物理基础。

1680 年前后，牛顿、胡克等少数物理学家已经知道，从开普勒第三定律“行星运动周期的平方和椭圆轨道半长轴的立方成正比”可以知道，太阳与行星之间的吸引力，一定与二者距离的平方成反比。问题是，与距离平方成反比的引力，是否能保证行星运动的轨道一定是椭圆。

1684 年左右，哈雷、胡克及雷恩，在一次聚会中探讨这一问题，胡克声称，他已经证明，太阳和行星间的引力如果与距离的平方成反比，则行星运动的轨道一定是椭圆。哈雷想看一下他的证明，胡克不肯。胡克说他想看看有没有其他人也能证明这一点，如有人能拿出证明，那时他再公布自己的证明来进行比较。于是哈雷跑去找牛顿，牛顿也声称自己早已证明了这一点。哈雷当即表示想看一下他的证明，牛顿当着哈雷的面翻腾了半天，也没有找出自己的证明来，但他答应马上再

证一遍给哈雷看。不久,哈雷收到了牛顿的证明。这是一篇长达 9 页的信件,后人给这篇短文加了一个名称——《论运动》。这是外人看到的第一个关于“引力与距离的平方成反比”一定导致“行星轨道为椭圆”的证明。

在 1687 年出版的《自然哲学之数学原理》一书中,牛顿最后给出了万有引力定律的完整表述:

两个物体间的万有引力与物体间距离的平方成反比,与两个物体质量的乘积成正比。即

$$F=G\frac{m_1 m_2}{r^2} \tag{7.1}$$

式中 m_1 与 m_2 为两个物体的质量,r 为二者的距离。G 为一个常数,称为万有引力常数。

2. 哈雷对彗星的预言

牛顿的万有引力定律,能够自然地推出开普勒的行星运动三定律,说明太阳系中的天体可能都是在万有引力的支配下运动的。

牛顿很想知道,太阳系中那些轨道与行星差异较大的天体,是否真的也是在万有引力定律的支配下运动。他想到了彗星,并想出了一个根据彗星在天空中的多次视位置推算出彗星轨道的方法。他用这一方法算出了自己亲眼目睹的 1682 年出现的彗星的轨道,发现这一轨道可能是一个很扁的椭圆。由于他很忙,就建议自己的朋友哈雷深入研究一下彗星的运动。哈雷最终用万有引力定律彻底弄清了彗星的运动规律。

彗星,在人类历史上是十分引人注目的。大彗星的尾巴,甚至可以横贯整个天空,让古人感到十分恐怖(图 7 - 1)。历史上,几乎没有一个民族认为彗星的出现是吉利的事情,所有的古人都觉得,彗星的出现预示着灾难将要降临,例如战争、瘟疫和各种天灾。

今天,我们知道彗星不过是一些“脏雪球”(图 7 - 2)。在海王星之外的

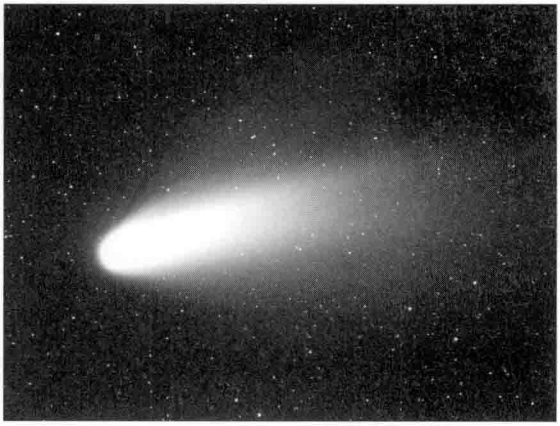


图 7-1　彗星

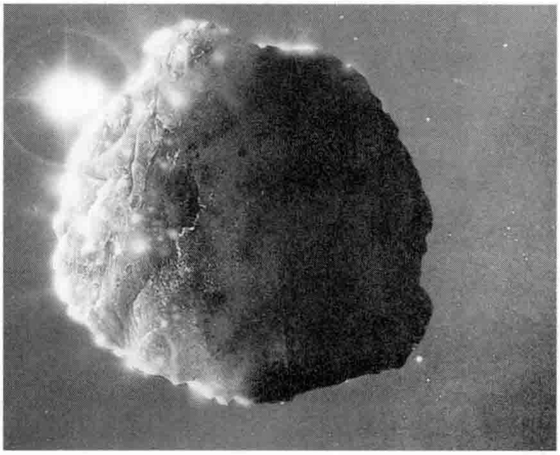


图 7-2　彗星是“脏雪球”

天区，存在着一个巨大的彗星“仓库”，那里有大量的“脏雪球”。这些“脏雪球”像行星一样围绕太阳转动，轨道的形状也与行星类似，一般不会飞近太阳和地球。但是，如果有一些微小的扰动出现，其中个别的“脏雪球”就会以极扁的椭圆轨道落向地球，也有一些“脏雪球”的“下落”轨道是双曲线或抛物线。当“脏雪球”趋近太阳时，会被太阳的光辐射所“汽化”，在固态球体的外面形成一个气体层。太阳不断地喷射粒子流，这种粒子流俗称“太阳风”。刮向“脏雪球”的太阳风会把它表面的气体压向背对太阳的一方，于是逐渐

出现了尾巴，成为我们通常所看到的彗星形态。随着彗星越来越接近太阳，它的尾巴就越来越长，越来越大，但总是背对着太阳。彗星在越过近日点后，将再次飞向远方，逐渐恢复为冰冻的雪球，消失在宇宙空间。那些轨道呈双曲线和抛物线的彗星将一去不复返，轨道是椭圆的彗星则将在若干年后再次返回(图7－3)。

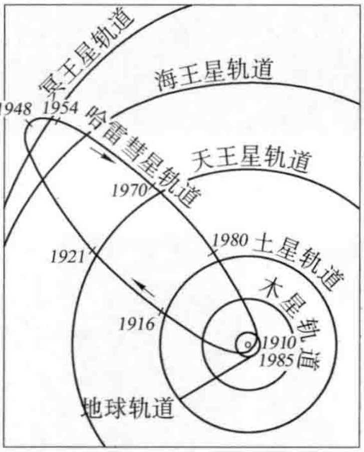


图7－3　哈雷彗星的轨道

哈雷注意到在1531年和1607年都出现过一颗大彗星，他觉得这两颗彗星与1682年出现的彗星样子相似，怀疑它们是同一颗彗星。哈雷接受牛顿的建议，对上述3颗彗星的观测数据进行了研究。他假设这3颗彗星是同一颗，用万有引力定律和观测数据算出了它的轨道。哈雷发现确实如牛顿所说，彗星轨道是远比行星的轨道要扁得多的另一种椭圆轨道。依据自己的研究成果，哈雷预言这颗彗星在76年后将再次出现。

哈雷没有活到那一年。但彗星真的在那一年(1758年)出现了，人们兴奋极了，把这颗彗星命名为哈雷彗星。哈雷彗星的按时出现，是万有引力定律的伟大胜利，使人们不再怀疑牛顿的伟大成就。

事实上，在人类历史上哈雷彗星曾多次出现。我们中国有对哈雷彗星最完整的观测记录。从公元前240年(秦始皇统一中国之前的战国时期)开

始,我们的祖先从未间断对哈雷彗星出现的观测和记录。这些记录毫无疑问对彗星的研究有着重要作用。

人们还可以用古人记录的彗星出现的年月,反过来推断历史事件发生的时间。例如,周武王克商的年份在历史上长期确定不下来。但有的历史记录表明,在武王克商的前后,曾有大彗星出现。有人曾假定这颗彗星是哈雷彗星,反转推算了武王克商的年份。这一研究对最终确定武王克商的时间,有一定的参考价值。

3. 支配潮汐的力量

人类早就注意到了海水的涨潮和落潮,并注意到了涨落潮与月相和太阳运动有一定关系。但人类始终不清楚,这一对航海和渔业有重大影响的自然现象,是受什么力量支配的。

牛顿的万有引力定律,圆满地解释了涨落潮现象。

引起海水涨潮和落潮的力,其实就是万有引力。潮汐力,就是万有引力的差。

一个人站在地面上,会受到地球的万有引力,但他头顶受到的引力与脚底受到的引力有一个微小的差值。这是因为头顶到地心的距离和脚底到地心的距离差一个人的身高。这点引力差大概有三四滴水的重量,非常小,我们平常根本不会注意到。

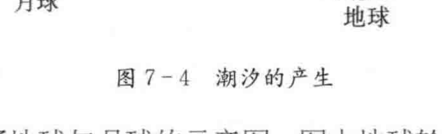


图 7-4　潮汐的产生

图 7-4 绘出了地球与月球的示意图。图中地球轮廓的实线是固体地表,虚线表示海面。A 点和 B 点到月球的距离差了一个地球的直径,正是这个差距造成了月球对 A、B 两点的可观的万有引力差,正是这个差造成了

A、B 两点的海水涨潮，而与 AB 连线成垂直的方向上，海水落潮。

月球引力是造成涨落潮的主要因素，此外太阳引力也是一个因素。当月、地、日在一条连线上时，A、B 两处涨大潮。当月地连线与日地连线垂直时，A、B 两点涨小潮。

4. 海王星的发现

人类用肉眼只能看到5颗行星，即金星、木星、水星、火星和土星。望远镜发明之后，天文学家发现了天王星。然而，仔细观测之后，人们发现根据万有引力定律算出的天王星轨道，却与观测有差异。于是有人开始猜测，是否还有一颗未知的行星，离我们比天王星略远一些，这颗未知行星的万有引力对天王星的运动有影响，从而造成观测到的天王星轨道与理论计算不符。

首先想到这一点的是英国的青年学者亚当斯。他用天王星轨道的这点偏差，反过来推算出了这颗未知行星在天空的位置，并于1845年把计算结果寄给了英国的格林尼治天文台。天文台的人一看，是亚当斯寄来的文章，亚当斯是谁？没有人知道，看来是个无名小卒，于是就没有理他。

法国天文学家勒维耶也几乎同时想到了这一点。他也用观测和理论的差值反过来算出了这颗未知行星的轨道，并于1846年在杂志上公开发表了自己的计算结果。他的文章被格林尼治天文台的人看到了，他们想起了自己同胞亚当斯的类似预言，于是把亚当斯的论文重新翻出来，并开始准备观测、寻找这颗未知行星。

勒维耶不知道亚当斯的工作，也不知道格林尼治天文台在准备观测。他非常想知道自己对未知行星的预言是否正确，于是当年就把论文寄给了德国的柏林天文台，这是因为德国的天文台比较先进。柏林天文台的台长收到勒维耶的信后，立刻布置助手观测，马上就发现了勒维耶预言的未知行星，时间是1846年。

格林尼治天文台听说后，赶紧加快步伐去找，也发现了这颗未知的

行星。

这颗未知的行星被命名为海王星。海王星是先用万有引力定律预言而后找到的,它的发现是万有引力定律的又一伟大胜利。万有引力定律从此成为了当时科学界最精确、最完美的物理定律。

5. 苹果落地的故事

关于牛顿如何发现万有引力定律,有一个著名的苹果落地的故事。

该故事的时间背景为牛顿23岁左右的时候。那时他刚刚从剑桥大学毕业,留校当老师,当时正好碰上英国闹瘟疫,他不得不回到母亲在乡下的庄园去躲避。在那长达一年半的空闲时间里,牛顿思考了很多问题,作出了一生中许多重要的物理发现与数学发现,诸如力学第一定律和第二定律、微积分的构想、光的色彩理论等。这一年半时间,后来被称为牛顿的丰收年。

这个故事说,在那段时间里,有一天牛顿正坐在苹果树下思考问题,突然有一个苹果从树上掉下来,落在牛顿的旁边。这个落地的苹果启发了牛顿的灵感,使他突然想出了万有引力定律(图7-5)。



图7-5　牛顿与落地的苹果

这个故事现在几乎家喻户晓。据说有的老师还问学生，为什么那么多人看见过苹果落地，都没有想到万有引力定律，而唯独牛顿想到了呢？试图用这个例子来启发学生的想象能力和创新能力。

不过，这个故事并不可靠，在牛顿生前没有外人听说过这个故事。牛顿一去世，这个故事就出来了。这个故事是法国启蒙思想家、文学巨匠伏尔泰传播开的。当时他正好被驱逐出法国，来到英伦三岛，刚到英国，就碰上牛顿逝世。

伏尔泰看到有6万多英国人为牛顿送葬，深感震惊，心想这个牛顿也太伟大了，我一定要访问一下他的亲属，直接了解一下这位伟人。

牛顿一辈子没有结婚，起先由他同母异父的妹妹照顾他的生活，妹妹死后则由他的外甥女照料。伏尔泰拜访的就是牛顿的外甥女婿。这位外甥女婿向伏尔泰讲述了这个故事。伏尔泰一听，太有趣了，于是把这个故事写成了一篇文章《牛顿的苹果》。由于伏尔泰在思想界、文学界的巨大影响，这个故事很快就被传遍世界各地，弄得家喻户晓。下面我们就简单介绍一下这位与牛顿有关但又从未谋面的文学巨匠。

6. “我的门第将因为我而显赫”

伏尔泰原名弗朗梭阿·马利·阿鲁埃，1694年生。他出生时身体很弱，接生的护士预言他最多活一天，结果他活了84年，预言的误差太大了。不过，他确实身体很差，一生的大半时间是在床上度过的，读书、写作、与人谈话通常是躺在床上。

伏尔泰这个人个子矮小，其貌不扬，生活轻浮，言语尖刻，才华横溢，充满了叛逆精神。他的作品轰动全国，写的剧本在巴黎常演不衰。他尖锐的笔锋直指教会和王公贵族，无情地揭露封建社会的黑暗。他在诗中写道：

“神父并不像你想象的那么聪明，我们无知才以为他们有学问。”

“应该相信,只相信自己的眼睛,让眼睛成为我们的上帝和圣经。”

当时的上流社会经常流传一些政治笑话,其中有不少是伏尔泰创作的。例如摄政王为了减轻政府的负担,卖掉了王宫中的马匹。伏尔泰评论道:“更为明智的做法,不是卖马,而是把政府中的那批蠢驴裁掉一半。”

也有很多政治笑话其实不是伏尔泰说的,但由于伏尔泰以能说政治笑话著称,所以一出现精彩的政治笑话,大家就猜想准是伏尔泰说的,他也因此倒了大霉。

有一次出现了一个政治笑话,暗示摄政王要搞政变。这件事情非同小可,对摄政王是性命攸关的事,大家又传说是伏尔泰说的。摄政王大怒,那天正好在公园里碰见了伏尔泰。摄政王简直恨得牙痒痒,怒不可遏地对伏尔泰说,“我要把你送到一个你从来没有见过的地方去。”伏尔泰问他:“什么地方?”他说:“巴士底狱的内部。”

第二天,伏尔泰就见到了那个地方。不过,还算好,摄政王并没有虐待他,只是把他软禁在里面不让出来。伏尔泰只能待在里面写作。他在那段时间里创作了不少文学作品,写诗的水平大有长进。“伏尔泰”这个笔名,也是他在那时候给自己起的。

关了差不多一年,摄政王突然发现那个要命的笑话并不是伏尔泰说的,于是就把他放了出来。这位摄政王还算有良心,对伏尔泰表示了歉意,作为补偿,还给他发了一年的年薪。拿到钱后,伏尔泰写了一封信,对摄政王深表感谢。他在信中还谈到,“以后我在巴黎的住处,就不劳您再费心了”,以此讽刺摄政王把他关进巴士底狱,是担心他在巴黎找不到住处,于是安排他住进了监狱。

出狱后的伏尔泰在上流社会更加活跃,经常在酒馆或沙龙里高谈阔论,这引起一些贵族的嫉妒和忿恨。有一次,他正在那里谈笑风生,一位贵族大喊:“那个高声说话的年轻人是哪个家族的?”意思是,“你什么家庭出身?”想羞辱他不是贵族子弟,血统低贱。伏尔泰坚定地回击:“我没有显赫的门第,但我的门第将因为我而显赫!”

那位贵族怒火中烧。于是他找了一批流氓，授意他们狠狠教训一下伏尔泰。这位贵族还特别交代，“不要打他的脑袋，那里面还有有用的东西。”

伏尔泰被打得遍体鳞伤。他一想，准是那位贵族干的。于是，身上、手上都缠着绷带的伏尔泰去找那位贵族，要跟他决斗。这位贵族很害怕，就找到警察局。因为决斗是非法的，警察就把伏尔泰抓起来，并驱逐出法国。

伏尔泰流亡到英国，不久就拜访了牛顿的亲属，写出了《苹果落地的故事》。这位思想和文化的巨匠，从此与科学伟人牛顿结下了不解之缘。

7. 伏尔泰幸福的流亡生活

流放期满后，伏尔泰返回法国，继续从事写作生活，并不断在沙龙和酒馆的聚会中热情奔放地高谈阔论。他的周围总是聚集着大量的听众，这些“粉丝”的哄笑和喝彩让伏尔泰感到飘飘然。

正在这时，伏尔泰的一本叫《英国书简》的著作出版了。法国的上流社会都惊呆了，伏尔泰的胆子也太大了，他怎么敢出版这样的书，怎么敢如此放肆地攻击教会和政府。伏尔泰自己也吓傻了，他并没有给出版商这本书的书稿。这些文章都是他在流放英国期间私下里写的文章和书信，并不是用来发表的，不知出版商从哪里搞到了这些文章，也不征求一下作者的意见就出版了。伏尔泰一看大事不好，决定赶快逃跑。不过，这次他没有一个人跑，而是和他的情人夏特莱夫人一起跑。

夏特莱夫人是一位贵族夫人。当时法国的上流社会流行老夫少妻。年轻美貌的女子与年老的贵族结婚，并不是喜欢老头，而是喜欢他们的财产和地位。虽然物质生活非常舒适，但这些贵夫人精神生活却十分空虚，她们的爱情和婚姻生活得不到满足，于是出轨的事经常出现，与人私奔的事也时有发生。不过，据说夏特莱夫人属于那种比较稳重的女人，谁也想不到她会私

奔,但她还是跟伏尔泰一起跑了。

他们逃到夏特莱家族在乡下的一个庄园——西雷庄园,这个庄园远离巴黎,比较安全。

在西雷,他们过起了快乐的同居生活。伏尔泰整天躺在床上写作,并抽空给夏特莱夫人讲授人文知识,后来他把讲授的内容整理成了著名的《风俗论》一书。商务印书馆出版的这本书的中文版有三大厚本。

夏特莱夫人其实也很不简单,她虽然缺乏人文知识,却比较熟悉自然科学。这是因为数学物理学家莫培督曾经当过她的私人教师。她在西雷庄园整天做自然科学实验,还把牛顿的巨著《自然哲学之数学原理》从拉丁文翻译为法文,并加了一些很有水平的注释。伏尔泰虽然精通文史,但对自然科学一窍不通。他对自己情人的科学才华十分惊叹。伏尔泰为《自然哲学之数学原理》的法文版写了序言,对他的情人大加赞扬,说夏特莱夫人的唯一缺点就是"她是一个女人"。

西雷庄园很快成了一个言论自由的小天地。许多人慕名而来,听伏尔泰高谈阔论,抨击腐朽的封建体制。

伏尔泰是法国大革命前夕出现的伟大启蒙思想家,他的作品为大革命的产生做了重要的思想准备。大革命爆发后,国王路易十六被关入监狱,他在那里才读到伏尔泰和卢梭的著作,不禁感叹道:"就是这两个人,搞垮了法国。"正确地说,就是这两个人搞垮了法国的封建社会。

8. "苹果落地的故事"是真的吗

这个苹果落地的故事,在伏尔泰听牛顿的外甥女婿讲之前,从没有外人听说过。伏尔泰把这个故事传开后,有人对其真实性表示怀疑,这时有两三位曾在牛顿身边工作过的仆人声称,他们也听牛顿讲过这个故事。不过,这几个人仍应该算作是牛顿的家人。实际上,没有一个外人声称听牛顿讲过此故事。

许多人认为，这个故事是牛顿的亲属为了确保他对万有引力定律的发现权而编造出来的。牛顿可不是一个谦虚的人，他很不客气地与别人争夺科研成果的发现权。中年以后的牛顿，在科学上没有什么重要发现，只是不停地与别人争吵，有时还采用极不光彩的手段。

牛顿曾与胡克争夺发现万有引力定律的优先权，弄得很不愉快。从史料看来，胡克确实对万有引力定律的发现有一定贡献，他研究过开普勒三定律与引力之间的关系，还与牛顿进行过通信讨论，指出过牛顿的一些错误。在一封信中胡克还明确指出他认为引力应该与距离的平方成反比。当然，牛顿在这一时期也已独立地认识到了引力应该与距离的平方成反比。这段讨论和通信发生在牛顿 37—38 岁的时候。当时牛顿和胡克都还没有认识到这种引力是所有物质间普遍存在的，是“万有”的。真正的完整的万有引力定律出现在牛顿 45 岁时出版的《自然哲学之数学原理》一书中。这部书出版时遇到了来自胡克的阻力，最后，牛顿不得不妥协了一下，在该书的序言中承认胡克是平方反比定律的发现者之一。

如果真的有过“苹果落地”的故事，牛顿不可能不对外人讲。这个故事发生在牛顿 23 岁到 25 岁之间，在乡下庄园里躲避瘟疫的那段时间。这件事将把他对万有引力定律的发现提早 20 年，那是胡克无论如何也望尘莫及的。

不过，平心而论，第一个正确、完整地阐述万有引力定律的人是牛顿，外界首次看到这一陈述是在他的巨著《自然哲学之数学原理》之中。当然，胡克也对发现引力的“平方反比性”有独立贡献，他与牛顿的通信讨论，也对牛顿最终得出万有引力定律有启发作用。

另外，正如牛顿本人所说，他做出科学发现是靠“不停地思考”。因此不能排除，牛顿从猜测太阳吸引行星的力、地球吸引月亮的力，以及地面上的重力可能是同一种力，到他寻找这种力的规律，并最终得出万有引力定律，经历过一个漫长的过程。所以，也有可能，他在庄园里躲避瘟疫时，已经开始了对引力问题的思考。但是，说他在那时候就已经得出了万有引力定律，肯定是缺乏根据的。

9. 牛顿与夫莱姆斯梯德的冲突

牛顿除去与胡克争夺万有引力定律的发现权，与惠更斯、胡克等人争论光的本质究竟是“粒子”还是“波”之外，还与天文学家夫莱姆斯梯德就观测资料的引用发生过激烈冲突。

在《自然哲学之数学原理》的第一版中，牛顿引用了夫莱姆斯梯德的天文数据。当此书再版时，牛顿听说夫莱姆斯梯德又有了一批新数据，就向他要，夫莱姆斯梯德不肯给。牛顿就自封为皇家天文台大总管，然后以大总管的身份命令夫莱姆斯梯德交出新数据。夫莱姆斯梯德很生气，断然拒绝。牛顿没有办法，就去找好友哈雷，让他去向夫莱姆斯梯德借用这批新数据，然后设法把它附在哈雷将要出版的一本书上，这样自己将来就可以合法引用了。没想到夫莱姆斯梯德及时发现了哈雷的企图，知道了这是牛顿的“阴谋”，就把哈雷告上了法庭。法庭裁决不准哈雷出版这本有剽窃行为的著作。

牛顿毫无办法，一气之下，就在自己的书再版时全部删去了来自夫莱姆斯梯德的数据。

夫莱姆斯梯德十分恼火，认为牛顿是一个“阴险的、野心勃勃的、极其贪婪的沽名钓誉者，根本不能容纳不同意见……”不过，他还是比较有度量的，最后能较为公正地评价了牛顿：“……归根到底是个好人，但生性多疑。”

10. 牛顿与莱布尼兹的争吵

牛顿做得最不好的恐怕是与莱布尼兹争夺微积分的发明权。两人在报上公开争吵，双方的朋友也参与进来。牛顿的朋友发表文章说是牛顿先发明的，莱布尼兹的朋友发表文章说是莱布尼兹先发明的。后来发现，有些以牛顿朋友的名义写的文章，实际上是牛顿本人写的。

在争吵过程中，莱布尼兹犯了一个错误。由于当时英国的科学比德国先进，莱布尼兹就要求英国皇家学会组织一个公正的委员会，来对两人的争吵进行裁决。莱布尼兹高估了牛顿的为人，他没有想到作为皇家学会会长的牛顿就敢胡来。牛顿任命了一个完全由自己的朋友组成的“公正的”委员会来进行裁决。这个委员会就裁决莱布尼兹剽窃。牛顿还亲自为委员会起草了裁决书。裁决公布后，牛顿仍觉得不解气，又匿名发表了一篇文章，追述他与莱布尼兹争吵的来龙去脉，以彻底把他搞臭。

莱布尼兹死后，牛顿还为自己使莱布尼兹伤透了心而沾沾自喜。

现在我们知道，牛顿是在研究瞬时速度时发明了微积分，莱布尼兹是在研究曲线的斜率时发明了微积分。两人是各自独立发明的，并不存在相互剽窃。牛顿发明微积分的时间比莱布尼兹早一些，但公开发表这一成果的时间则比莱布尼兹晚一些。他们两人都是当之无愧的微积分的创建者。

牛顿与莱布尼兹的冲突不止限于微积分的发明权。莱布尼兹是位全才，他的贡献是多方面的。他不仅研究数学、物理、哲学和自然法则，还研究历史、法律、神学和外交。

莱布尼兹对时空和物质的看法与牛顿针锋相对。牛顿认为存在绝对的空间和绝对的时间，时空与物质无关，没有物质，时间和空间依然存在。

莱布尼兹则认为时间和空间都是相对的，根本不存在绝对的时间，也不存在绝对的空间。时间和空间都不能脱离物质而存在。时间不过是发生的事件的先后的罗列，空间不过是物体相对位置、方向和距离的体现。没有物质，也就不再有时间和空间。

牛顿和莱布尼兹的时空观，都有其合理的一面，都长期影响着自然科学，特别是物理学的发展。在当代物理学的前沿领域(例如相对论和量子论)，都不难看到牛顿时空观和莱布尼兹时空观的影响。

11. 神坛上、下的牛顿

牛顿和爱因斯坦无疑是两位最伟大的物理学家，也可以说是两位最伟大的科学家。牛顿的《自然哲学之数学原理》一书，长期被视作经典物理学的“圣经”。书中明确提出了时间、空间、速度、加速度、质量、动量和力等重要物理学概念，提出了著名的力学三定律和万有引力定律，并把这些内容建立在哲学思考、数理逻辑和科学实验的基础之上。他创建的力学体系成为了物理学所有分支，乃至整个自然科学的样板。他还是微积分的主要创建者之一，对数学也作出了重大贡献。

不过，牛顿的上述成就都是他中、青年时期完成的。中年以后的牛顿不是一个招人喜欢的人物，对科学的贡献寥寥无几，他的主要精力几乎全部放在了与人争吵上，主要是与人争夺科学发现的优先权。从前面的例子可以看出，有些争吵属于学术争论，应该说是正常的；有些争吵就显得十分功利。

中年以后的牛顿很想发财，后来终于当上了造币厂的厂长。他在金融领域也展现了非凡的才华，稳定了金融体系，促进了对经济至关重要的货币金本位制的建立。同时，他也毫不留情地把几个造假币的人送上了绞架。

许多人认为，晚年的牛顿之所以十分刻薄，和他少年时的遭遇有关。少年牛顿经历过不少苦难，受到过太多的歧视，这些苦难和歧视扭曲了他的心灵和性格。

也有人认为，对牛顿的不少批评也言过其实。例如，有人认为晚年的牛顿很像政客，在国会中过于活跃。但也有人反驳，说自己只听到过一次牛顿在国会中高声讲话，那次他大喊了一声“把窗户关上！”

总之，牛顿是一位伟人，是一位非常伟大的伟人，但他不是完人。其实，世界上根本就没有完人，那些自以为自己是完人，或者接近完人的人，

其实都是些庸人，庸人不会引人注意，当然也就没有人关注他们的错误和缺点。

牛顿就像具有黑子的太阳一样，在科学史上光芒万丈。

每一位有志气的青年，都应该争取去做一个对祖国、对人民有重大贡献的伟人，而不要在小事上过多计较名与利。

第八章　走向广义相对论

1. 相对论的困难

前面说到,当牛顿的物理学理论取得巨大成功的时候,人们觉得似乎一切物理学规律都搞清楚了,于是英国诗人波普写了一首盛赞牛顿的诗:

自然界和自然界的规律隐藏在黑暗中,

上帝说:“让牛顿去吧!”

于是一切成为光明。

爱因斯坦的相对论提出后,在相当长的一段时间内,真正理解相对论的人寥寥无几,绝大多数人都感到震惊和迷茫,原来那似乎已十分清晰的物理学,竟然冒出了如此多令人难以置信的结论,让人完全看不懂了。于是另一位诗人又接着波普的诗句写道:

但不久,

魔鬼说:“让爱因斯坦去吧!”

于是一切又回到黑暗中。

绝大多数人在赞扬相对论的神奇和伟大,但又弄不懂艰涩的内容。有一些人对相对论产生怀疑,也有一些人开始对它进行批判和指责,认为相对论错误而荒唐。但爱因斯坦知道,这些对相对

论的指责都是错误的，都是由于看不懂相对论所致，因而都不值得一驳。

那么，他的相对论有没有问题呢？爱因斯坦知道，他的相对论存在问题，而且存在根本性的大问题，但不是外人指责的那些东西，外人指责的问题其实都不是问题。

2. 惯性系无法定义

爱因斯坦认为相对论有什么问题呢？他认为有两个根本性的大问题。第一是惯性系无法定义了。他的相对论建立在惯性系的基础上，但现在惯性系无法定义了，好像楼房建立在流沙上一样，这可是个严重问题。

在牛顿理论中，惯性系的定义没有问题。惯性系的定义依赖于绝对空间的存在。牛顿认为(实际上是假定)存在一个不依赖于物质的绝对空间，还存在一个不依赖于物质的绝对时间。惯性系被定义为相对于绝对空间静止，或者做匀速直线运动的参考系。

爱因斯坦认为不存在绝对空间，也不存在绝对时间。这样，原来关于惯性系的定义就不能使用了。令人意想不到的是，这个貌似简单的惯性系定义问题，却十分不好解决。爱因斯坦思考了很长时间，始终得不到满意的答案。

一个聪明的想法是，利用牛顿第一定律(惯性定律)来定义惯性系：如果参考系中一个不受外力的质点，总是保持静止状态或者匀速直线运动状态，那么这个参考系就可以定义为惯性系。

然而，怎么知道一个质点不受外力呢？似乎只要没有其他物体碰到它，就可以判断它不受外力了。但仔细一想，不行。因为还可能存在看不见的作用，例如外场(电磁场、引力场或其他未知的什么场)。要想严格判断一个质点受不受外力，唯一有效的办法是看它是否保持“惯性状态”，也就是说，要看它在惯性系中是否保持静止或匀速直线运动状态不变。明眼人一下就可以看出，这里存在逻辑循环的问题。定义惯性系要用到“不受外力”这个

概念,定义“不受外力”又要用到“惯性系”这个概念。这种循环定义方式在自然科学中是绝对不容许的。

爱因斯坦对这个问题百思不得其解。

3. 万有引力纳不进相对论的框架

相对论的另一个重要困难是“万有引力定律”纳不进相对论的框架。当时物理学家们只知道两种力,一种是电磁力,另一种就是万有引力。电磁理论可以纳入相对论的框架,与相对论一点都不抵触。事实上,在相对论诞生之前出现的麦克斯韦电磁理论,本来就是一个相对论性的理论。迈克尔孙实验导致的“乌云”,反映的是麦克斯韦电磁理论与伽利略变换的矛盾,也就是说,反映的是电磁理论无法纳入伽利略—牛顿的经典物理学框架的问题。现在相对论取代了伽利略—牛顿理论,这一新框架恰好与电磁理论匹配,所以,电磁理论与相对论自然相容。

爱因斯坦花了不少时间尝试把万有引力定律也纳入相对论的框架,但始终不成功。自然界只存在两种力,其中一种就与相对论矛盾,爱因斯坦认识到,这个问题可不能低估。

4. 广义相对性原理

在对上述两个困难反复思考后,爱因斯坦的思想产生了一次飞跃。他想,既然惯性系无法定义,可不可以干脆不要“惯性系”这个概念。提出“惯性系”的概念,主要是为了描述物理规律方便,特别是为了体现自然界中的物理规律具有普遍性,这种普遍性通常用所谓的“相对性原理”来表述。相对性原理是说:“在所有惯性系中,物理规律都相同”。

爱因斯坦想,可不可以把相对性原理加以推广,认为物理规律在所有参考系中都相同,不再区分惯性系和非惯性系。这样就可以不用惯性系这个

概念了,当然也就不再需要定义惯性系了,这样就避开了定义惯性系的困难。

他把这样推广的相对性原理,称为“广义相对性原理”:物理规律在所有参考系中都相同。

做这样的推广虽然避开了定义惯性系的困难,却产生了一个新困难。非惯性系与惯性系不同,位于其中的物体会受到惯性力。例如在转盘上的物体会受到惯性离心力,在转盘上运动的物体还会受到科里奥利力(另一种惯性力)。惯性力与普通的力有本质的不同,它不需要外界施于,也不存在反作用力。所以,如何看待非惯性系中的惯性力,也是个不好办的问题。

5. 引力质量与惯性质量

在对引力困难和惯性力困难反复思考后,爱因斯坦注意到引力和惯性力有一点相似,就是二者都与物体的质量成正比。

在牛顿力学中,质量有两种定义,一种是用引力效应定义的,另一种是用惯性效应定义的。

牛顿在他的巨著《自然哲学之数学原理》中,一开始就对质量下了一个定义。他说,质量就是“物质的量”,它与物体的重量成正比。这种反映物体中所含物质的多少,并规定为“与物体重量成正比”的质量,被称为引力质量。在此书的另一个地方,他又谈到质量与物体的惯性成正比。也就是说,质量越大,物体的“惯性”就越大。这样定义的质量被称为惯性质量。引力质量 m_g 出现在万有引力定律中,惯性质量 m_I 则出现在力学第二定律中,分别如(8.1)式与(8.2)式所示,

$$F=G\frac{Mm_g}{r^2} \tag{8.1}$$

$$F=m_Ia \tag{8.2}$$

牛顿本人意识到,没有理由认为这两种质量是同一个东西。他曾用单摆实

验来检测二者是否有差异。图 8－1 中，W 为摆锤受到的重力，T 为摆绳的张力。

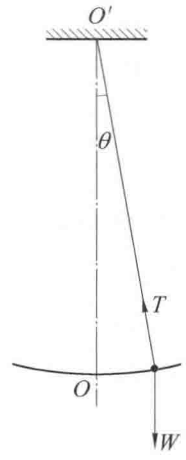


图 8－1　单摆实验

大家熟知单摆周期公式

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \tag{8.3}$$

其中 l 为摆长，g 为当地的重力加速度。这个公式是把万有引力定律和力学第二定律联立而得到的。但推导得出的原始公式并不是(8.3)式，而是(8.4)式

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m_I l}{m_g g}} \tag{8.4}$$

牛顿想，可以用各种物质成分的小球(例如铁球、金球、玻璃球、石头球等)作摆锤，来检验一下各小球的 m_g 与 m_I 之比是否为同一个常数。如果是同一个常数，则可以把此常数吸收到万有引力常数 G 中去，重新定义 G 值，并使 m_g 与 m_I 之比等于 1。也就是说，只要各小球的 m_I 与 m_g 之比为同一个常数，就等于证明了

$$m_g=m_I \tag{8.5}$$

所以只要检测一下各种小球做成的单摆是否周期相同就行了。牛顿在10^{-3}的精度范围内证明了(8.5)式成立，也即在千分之一的精度范围内证明了引力质量与惯性质量相等。这也就是后人把单摆周期公式直接写成与质量无关的(8.3)式的原因。

在牛顿之后，继续有物理学家对(8.5)式是否成立做更精确的检验。在爱因斯坦那个时代，匈牙利物理学家厄缶(Etvös)用扭摆在10^{-8}的精度范围内证实了(8.5)式，即证实了引力质量与惯性质量相等。

6. 惯性力的起源——水桶实验

爱因斯坦在回顾了上述研究后，觉得引力与惯性力的背后可能存在某

种内在联系。但是,惯性力与引力有一个本质不同,引力起源于物质间的相互作用,但惯性力似乎并不起源于物质间的相互作用,而且惯性力与所有力都不一样,似乎没有反作用力。

这时爱因斯坦回忆起他在“奥林匹亚科学院”的活动中,曾和朋友们一起读过奥地利物理学家马赫的一本书——《力学史评》。这本书曾使他大感兴趣,并反复琢磨。

马赫只是一位不太知名的物理学家,能留下来的科研成果仅仅是流体力学中的“马赫数”。从物理的角度看,他没有太大成就。但有一点他很了不起,他敢于批判牛顿,说“祖师爷”不对。马赫持“相对主义”的哲学观点。他认为一切运动都是相对的,不存在绝对运动,牛顿设想的“绝对空间”和“绝对时间”都不存在。

当年,牛顿为了论证“绝对空间”的存在,曾设计了一个思想实验——水桶实验。牛顿设想有一桶水(图8-2)。首先让桶和水都静止,如图8-2中的(a)图,这时水没有受到惯性离心力,水面是平的。然后让桶以角速度ω转动,由于水与桶壁的摩擦力很小,刚开始时桶转水不转,这时水面仍是平的,表明水没有受到惯性离心力,如图(b)。此后水慢慢被桶带动起来,逐渐也以角速度ω转动,这时水受到了惯性离心力,水面变成了凹形,如图(c)。然后让桶突然停止,由于桶壁摩擦力小,水不会马上停下来,仍以角速度ω转动,这时水面仍是凹的,这表明水仍受到惯性离心力,如图(d)。

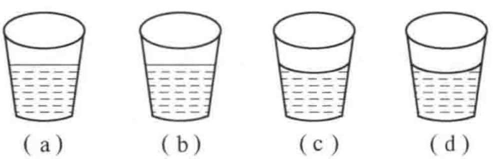


图8-2 水桶实验

牛顿说,第一种情况水与桶都静止,当然水相对于桶也静止,这时水面是平的。第三种情况水与桶都以角速度ω转动,水相对于桶仍是静止的,然而水面呈了凹形。这两种情况水相对于桶都静止,显然第一种情况水没有

受到惯性离心力,第三种情况水却受到了惯性离心力。再看第二种与第四种情况:第二种情况桶转水不转,第四种情况水转桶不转,虽然这两种情况水相对桶都转,但第四种情况水受到了惯性离心力,第二种情况却没有。牛顿通过上述分析,断定水受不受到惯性离心力,与水相对于桶的转动无关。那么,与什么有关呢?牛顿认为,这表明存在一个"绝对空间",只有相对于绝对空间的转动才是真转动,才会受到惯性离心力。如果只是相对于某个物体(例如桶)转动,相对于绝对空间并不转动(如情况二),则不会受到惯性离心力。牛顿认为,水桶实验表明,确实存在一个绝对空间,他并断言,转动应该看作绝对运动。推而广之,只有相对于绝对空间的加速,才是真加速,才会受到惯性力。如果只是对其他物体加速,并未对绝对空间加速,这样的加速只能看作假加速,做假加速的物体不会受到惯性力。这样,牛顿论证了绝对空间的存在,并认为惯性力的起源与绝对空间有关。

7. 马赫原理

马赫认为不存在绝对空间,那么他必须对牛顿的水桶实验和惯性力的起源给出一个合理的解释。马赫认为一切运动都是相对的,惯性效应起源于物体间的相互作用,起源于它们之间的相对加速。

图 8 - 2 中(c)、(d)两种情况,水受到惯性离心力。马赫认为这是由于水相对于宇宙中所有物质转动而引起的,这些物质主要聚集于遥远星系中。由于转动和其他运动一样,完全是相对的,所以这也相当于水不动,整体宇宙中的物质(包括遥远星系)反向转动。在反向转动中所有这些物质对水施加的影响,表现为惯性离心力,从而使水面呈凹形。

(a)、(b)两种情况,水相对于遥远星系没有转动,所以未受到来自遥远星系施加的影响,也即未受到惯性离心力。在情况(b)中水相对于桶是有转动的,但桶的质量与全宇宙所有的物质(主要是遥远星系)相比,完全可以忽略,桶相对于水转动产生的影响当然也就可以忽略不计。

所以,马赫认为,惯性离心力产生于遥远星系相对水转动时施加的影响。包括惯性离心力在内的所有惯性力都起源于物质间的相互作用,这种相互作用是物质间做相对加速运动而引起的。

爱因斯坦赞成马赫的观点,认为不存在绝对空间,所有的运动都是相对的。他把马赫的思想总结、升华为“马赫原理”,按照这一原理,惯性力起源于受力物体相对于宇宙中其他物质的加速,正是这种“相对加速”使受力物体与宇宙中的其他物质产生了相互作用,这种相互作用就表现为惯性力。

爱因斯坦看到,按照马赫的思路,惯性力与万有引力类似,都起源于物质间的相互作用。于是他进一步猜测,惯性力与万有引力可能有着相同或相似的根源,二者可能存在更深刻的内在联系。

8. 等效原理

爱因斯坦反复思考引力质量与惯性质量的相等,以及万有引力与惯性力的相似。一天,他的思维突然产生了一次飞跃。当时他正坐在发明专利局的办公桌旁,突然想到:假如有一个人从高处落下,这个人一定会感受不到自己的重量,会处在失重状态。爱因斯坦后来回忆,正是头脑中的这一火花,把他引向了等效原理,并进而引向了广义相对论的构思。

爱因斯坦的等效原理认为,万有引力和惯性力在无穷小的时空范围内是不可区分的。他用一个思想实验来说明等效原理,这个思想实验就是所谓的“爱因斯坦升降机”。升降机就是电梯。

如图8-3所示,有一个人位于封闭的升降机内,看不到外面。他站在一个磅秤上,手拿一个苹果。当升降机停在一个星球的表面上时,这个人感受到重力,磅秤上显示出他的重量。他一松手,苹果就会在重力作用下做自由落体运动(图8-3(a)左图)。如果升降机并未停在星球表面,它处在远离引力场的星际空间中,但升降机下部安装了火箭发动机,发动机使升降机以加速度 a 运动。这时升降机中的人同样会感到受到重力,感觉到自己有重量,

一松手苹果也会按自由落体规律下落(图 8－3(a)右图)。人的感受与升降机静止在星球表面时完全一样。由于他看不见外面,他无法判断升降机究竟是静止在星球的表面上呢,还是在远离星球的无引力场空间中加速呢？爱因斯坦认为,升降机中的人完全无法区分自己受到的是万有引力还是惯性力。

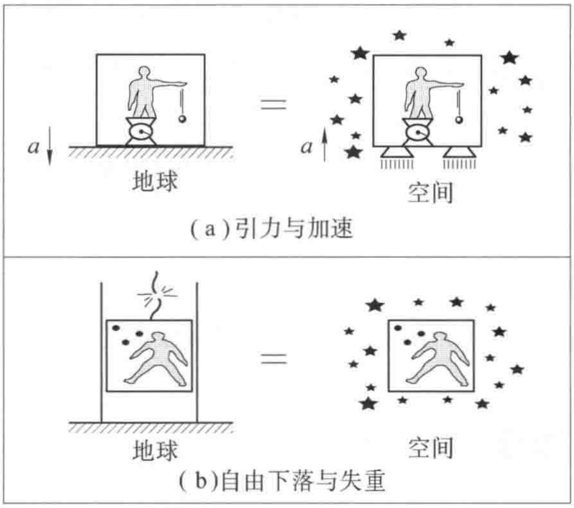


图 8－3　爱因斯坦升降机

图 8－3(b)的左图,表示升降机的缆索断了,它在重力场中自由下落,这时其中的人将感到失重。该图的右边则表示升降机在远离所有星体,因而在不存在万有引力的星际空间中作惯性运动,即静止或作匀速直线运动。这时其中的人也会感到自己失重。在上述感受到失重的情况下,升降机中的人也将无法判断自己是在引力场中自由下落呢,还是在无引力场的太空中作惯性运动呢?

爱因斯坦用这个思想实验来说明,引力场和惯性场是等效的。

9. 注意:“等效”只在一点的邻域

不过应该说明,引力场与惯性场的等效是“局域”的,也就是说这种等效只在无穷小的时空范围内成立。如果升降机足够大,内中的人还是能够区

分自己受到的力究竟是万有引力还是惯性力。此时,人可以在升降机地板的每一处放一个重力仪。如果升降机停在星球表面,重力仪显示的力线应该是会聚的,指向星球的球心。如果升降机是在无引力场的太空中加速,则力线应该是平行的。所以只要升降机有一定大小,重力仪又足够精确,引力和惯性力的差异就可以检测出来。因此,严格地说,引力场与惯性场的等效是“局域”的,也就是说,等效原理只在无穷小的时空范围内成立,是一个局域性的原理。

我们有时会听到一些反对等效原理的声音,这些声音的发出者大都没有弄清楚等效原理是一个“局域”性的原理,他们在一个有限的时空区域内“发现”引力场和惯性场可以区分,以为发现了爱因斯坦的“错误”。其实,这不是爱因斯坦的错误,而是反对者误解了“等效原理”。

10. 等效原理与$m_g = m_I$

等效原理可以分为弱等效原理和强等效原理。

弱等效原理:无法用任何力学实验在无穷小时空范围内区分引力场和惯性场。

强等效原理:无法用任何物理实验在无穷小时空范围内区分引力场和惯性场。

后来的研究表明,弱等效原理和“引力质量与惯性质量相等”是等价的,二者可以互相推出。由于$m_g = m_I$有很强的实验基础,目前已在10^{-12}的精度范围内得到验证,所以弱等效原理得到了强有力的实验支持。

强等效原理没有如此精密的实验基础,但在使用中也没有发现过任何问题。

值得注意的是,作为广义相对论理论基础的是强等效原理,仅仅弱等效原理是不够的。所以,我们也可以反过来认为,广义相对论的任何成功,都可以看作是对强等效原理的支持。

11. 思想的飞跃：万有引力莫非是几何效应

等效原理揭示了引力效应与惯性效应之间确实存在本质联系。

伽利略的自由落体定律告诉我们，在真空状态下，引力场中自由下落的各种小球，不管它们的物质组成（例如金球、石球还是木球），也不管它们的质量大小，下落规律都是相同的。

推而广之，设想若干在真空引力场中做斜抛运动的小球，只要它们抛射的角度相同，离开弹射器时的初速也相同，那么不管它们的物质成分和质量大小如何，它们也将描出同样的轨迹。

我们知道，通常一个物体在外界环境中受到的外力大小，往往与物体的物质成分、物理状态有关。例如，一个物体在电磁场中受到电磁力的大小，与它是金属还是非金属，它是否带电，带电多少等有关。而且，不同物体在同一个电磁场中的运动轨迹，不仅和物体的物理成分及状态有关，也与它们的质量大小有关。

但是引力场中的小球运动，居然与这些物理因素都无关，这是怎么回事呢？实在是太神奇了。

爱因斯坦意识到，万有引力不是一般的力，与我们通常熟悉的所有的力都不同。这是一种极为特殊的力。

爱因斯坦反复思考这个问题，突然眼前一亮：万有引力莫非是一种“几何力”？莫非真如黎曼的推测，真实的空间可能是弯曲的？万有引力莫非是时空弯曲导致的几何效应？

爱因斯坦回忆起，在“奥林匹亚科学院”的活动中，他们几位年青人曾一起读过数学大师庞加莱的科普著作《科学与假设》。在那本书里，他们曾读到罗巴切夫斯坦和黎曼等发现的非欧几何，这一几何描述了弯曲的空间。黎曼等数学家曾推测，真实的空间有可能不是“平”的，而是“弯”的，而且真实的空间有可能不是 3 维的，而是 4 维，甚至更高维的。该书的内容曾使这

几位年青人一连几个星期兴奋不已。

现在,爱因斯坦看到,黎曼等人的数学结果,竟然与自己当前研究的物理问题有关,这太让人兴奋了。

但是,爱因斯坦对非欧几何了解甚少,于是他求助于自己的老友格罗斯曼。格罗斯曼当时已是苏黎世工业大学的数学系主任了,他立刻放下手中的工作,再次为自己这位杰出的好友帮忙。他查了几天文献,然后告诉爱因斯坦,有几个意大利数学家正在研究和发展黎曼几何,他建议爱因斯坦沿这条路走下去。为了进一步帮助爱因斯坦,格罗斯曼开始与爱因斯坦一起钻研黎曼几何,这大大加快了爱因斯坦掌握黎曼几何的速度。

下面我们就来简单介绍一下黎曼几何。

12. “第五公设”带来的疑义

我们通常学习的几何,都是欧氏几何。欧氏几何产生于人类文明的发源地古埃及和两河流域,起源于河水泛滥后重新划分土地的需要,以及建筑等生产活动的需要。在公元前300年左右,在埃及亚历山大城工作的希腊数学家欧几里得把积累起来的几何知识集其大成,写成一部《几何原本》。我们中学学习的几何知识,都来源于这个《原本》,都没有超出当年欧几里得的水平。

欧几里得几何以它概念的清楚、知识的丰富、逻辑的严密而著称。《几何原本》的全部知识建立在几条公理(又称“公设”)的基础上。全书从这几条公理出发,推出了全部几何知识。

在惊叹欧氏几何的完美的同时,有少数数学家觉得似乎它还有可以改进的地方。例如,一些人注意到它的“第五公设”,即我们通常所说的平行公理:

“过直线外一点,可以引,而且只可以引一条直线,与原直线平行(即不相交)。”

这些人觉得这条公设比其他公设都长，有点遗憾。于是有人试图从其他公设来推导“第五公设”，如果能够推出，就可以取消这条公设，此公设的内容就可以当作定理了。这样，欧氏几何会显得更“简洁”，更“完美”。

令人意外的是，这件工作十分困难。有关推导“第五公设”的尝试进行了一千多年，仍然没有进展。有时高兴了一下，似乎推出来了，仔细一想还是不行，推导者不经意地引入了其他假设，例如假设“三角形三内角之和是180度”。实际上这条假设是和“第五公设”等价的，它们之间可以相互推导。也就是说，并未能真正取消“第五公设”。

13. 罗巴切夫斯基的突破

上述努力进行到19世纪的时候，情况发生了变化。

首先是俄罗斯喀山大学的教授罗巴切夫斯基做出了突破。他用反证法来证，假设“过直线外的一点可以引两条以上的直线与原直线平行”，试图推出谬误。然而，他在证明的路上长期徘徊，越走越远，却始终见不到谬误的影子。

这时他的思想突然产生一个飞跃：看来也可以用“过直线外的一点可以引两条以上的平行线”作公理，取代“第五公设”，从而建立起一套新几何，这套新几何应该是与“欧氏几何”并列的另一套几何体系。他非常兴奋，把有关的研究成果写成论文，寄给位于首都彼得堡的科学院。但是彼得堡科学院的数学家的思想都跳不出欧氏几何的束缚，都看不懂罗巴切夫斯基的论文。他们觉得，这位教授疯了，过直线外的一点怎么可能引出两条以上的平行线？他们拒绝了罗巴切夫斯基的论文，但不久，罗巴切夫斯基又来信了，不仅重申自己的观点，而且理论似乎又有了新发展。科学院的数学院士们愤怒了，这位教授怎么了？这么简单的道理都不懂，还当什么教授！于是，院士们做了一个决定：“以后，罗巴切夫斯基有关这方面的论文”，我们都不

必再审了,完全胡说,不要再理他。

罗巴切夫斯基只好把自己的研究成果发表在喀山大学学报上。由于那里远离世界的数学中心,没有人能看到他的工作。于是罗巴切夫斯基想到欧洲内地去,周游列国,宣传自己的学术观点。

学术旅游令人失望,没有人肯定他的工作。他在德国作报告时,大数学家高斯参加了会议。年迈的高斯听完报告没有对他的新几何发表意见,只是建议德国科学院授予他通讯院士的称号。这是给予外国学者的最高荣誉,承认他是一位杰出的数学家,但没有具体对他的新几何发表看法。事后,高斯在自己的日记中,以及给朋友的信中都提到过罗巴切夫斯基的新几何。高斯说,他相信当时在会场上,只有他一个人听懂了罗巴切夫斯基的报告。实际上,高斯早就思考过类似的问题,得到过类似的成果。但是由于欧氏几何是教会推崇的,高斯胆小,他想到了哥白尼提出日心说的遭遇,于是决定对此保持沉默。

罗巴切夫斯基遗憾地回到家乡,但他没有放弃,他坚信自己的新几何是正确的,继续进行研究。后来他双目失明,在学生的帮助下完成了全部新几何的建立。他所创立的几何,被称为罗巴切夫斯基几何,简称罗氏几何。令他欣慰的是,他在逝世前,知道了自己的新几何已被数学界承认。

14. 鲍耶的功绩

对罗氏几何独立作出重大贡献的还有匈牙利青年数学家鲍耶。鲍耶是数学系的学生,他也对“第五公设”很感兴趣。与罗巴切夫斯基类似,他试图用反证法来证明“第五公设”,假设“过直线外的一点可以引两条以上的平行线”。在经过多次努力找不出谬误后,他也终于认识到可以把此假设看作公理,取代“第五公设”建立另外一套新几何。他的研究成果与罗巴切夫斯基类似,时间比罗巴切夫斯基稍晚一点,但他并不知道罗巴切夫斯基的工作,完全是自己独立发现的。

鲍耶的父亲也是数学家，是高斯的同学。在听说儿子在试图证明“第五公设”时，鲍耶的父亲急坏了，赶忙给他写信，说：“我的儿子，你千万别再做这项研究了，不要再浪费自己的青春和才能了，你爹我就是因为研究这个问题，结果一辈子几乎一事无成。”不过，这时鲍耶已经悟出了其中奥秘，看到了新几何的曙光。

他父亲知道后，也暗自心喜，就把鲍耶的工作寄给高斯，征求他的意见。高斯回信说，“我实在无法赞扬你的儿子，因为赞扬他就等于赞扬我自己，其实你儿子的想法，我多年前就有了。”

鲍耶一听就气坏了，他以为高斯想靠自己的声望来篡夺他的科研成就。一气之下，鲍耶终止了这方面的研究。幸亏他父亲把他的研究成果作为附录，附在了自己写的一本书的后面，才使他的成就没有被掩盖。由于匈牙利位于欧洲的中心部分，鲍耶的工作先于罗巴切夫斯基而被数学界了解。

15. 黎曼几何的创立

人们终于认识到存在一种不同于欧氏几何的新几何，称其为非欧几何。不久之后，德国的黎曼采用另一条新公理取代第五公设，创建了另一种非欧几何。黎曼的新公理认为，“过直线外的一点，一条平行线也得不出来”。数学界很快认识到这三种几何都是正确的，它们反映不同曲率空间的性质。人们把罗巴切夫斯基和鲍耶创建的几何称为罗氏几何，把黎曼创建的几何称为黎氏几何。欧氏几何是平直空间中的几何，黎氏几何是正曲率空间中的几何，罗氏几何则是负曲率空间中的几何，这三种几何的特点列在表 8－1 中。图 8－4 则分别给出了二维黎氏空间（球面）和二维罗氏空间（马鞍面）的图像。球面上每一点的曲率都是正的，马鞍面上负曲率的点则仅限于鞍点附近。

表 8－1　三种几何的对比

	空间曲率	平行线	三角形三内角之和	圆周率	例
黎氏几何	正	无	＞180°	＜π	球面
欧氏几何	零	一条	＝180°	＝π	平面
罗氏几何	负	两条以上	＜180°	＞π	马鞍面

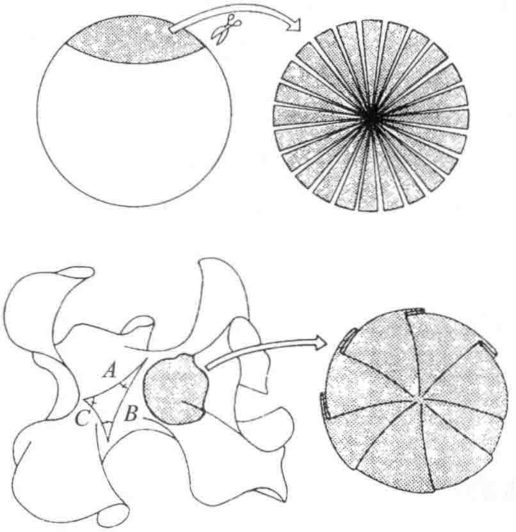


图 8－4　正、负曲率空间的例子

1845年，黎曼把这三种几何统一起来，统称为黎曼几何，并用这一工作，在哥廷根大学的数学系作报告，谋求一个讲师的位置。由此也可以看出，哥廷根大学的数学水平有多么高，真不愧是那个时代全世界的数学中心。

黎曼天才地预见到，真实的空间有可能不是平直的，物质的存在有可能造成空间的弯曲。由于当时的物理学还没发展到应用黎曼几何的水平，黎曼的预见还仅仅是一种猜测。

到了1910年左右，爱因斯坦开始猜想到万有引力可能是一种几何效应，当他准备用“时空弯曲”的思想来发展相对论的时候，黎曼几何已经为他做好了数学准备。

16. 什么是弯曲空间中的“直线”和“平行线”

前面谈到的罗氏空间和黎氏空间都是弯曲空间，弯曲空间中怎么可能会有“直线”和“平行线”呢？

实际上，弯曲空间中的“直线”并不是我们通常所说的直线，而是直线在弯曲空间中的推广。在欧氏几何中，直线定义为两点间的最短线。弯曲空间中的两点之间虽然不可能画出平常意义下的直线，但两点之间仍然存在最短线。在黎曼几何中，把两点之间的最短线称为“短程线”（又称测地线）。短程线，就是直线在弯曲空间中的推广。在空间平直的时候，短程线就恢复为我们通常看到的直线。

所谓平行线，就是两条不相交的直线。所以平行线公理在罗氏几何中表述为：

“在一条短程线之外，可以引两条以上的短程线与其不相交”，

在黎氏几何中则表述为：

“在一条短程线之外，不可能引出与其不相交的短程线”。

为了更好地理解黎曼几何，我们以球面为例来加以解释。球面是正曲率的二维空间，在上面适用的是黎氏几何。

研究表明，球面上的短程线为大圆周。在球面上任取两点 A 与 B，再加上球心 O，这三点可以决定一个平面，此平面与球面的交线就是大圆周。地球上的经线都是大圆周，赤道也是大圆周，但赤道之外的其他纬线都不是大圆周。

从北京飞往多伦多（或纽约）的飞机，从北京起飞后，不像一般人想象的那样直接向东越过太平洋，而是向东北方向飞，通过中国东北、俄罗斯的远东地区，直奔白令海峡，然后沿阿拉斯加的北海岸飞行，再转向东南，通过加拿大东部，到达多伦多。有人可能会问，飞机为什么要绕圈子呢，直接往东飞不是近一点吗？干吗要绕远呢？其实，飞机并没有绕远，飞机的航线恰好

是北京、多伦多和地心这三点决定的大圆周，也就是说，恰好是北京和多伦多之间的短程线。

你可以想一想，能够过赤道外一点再作一个大圆周与赤道不相交吗？肯定不行。所以黎氏几何的“平行公理”在球面上完全正确。

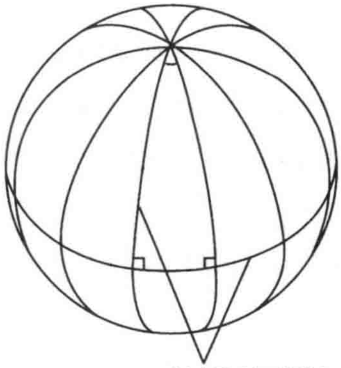


图8-5　球面上的短程线和三角形

再看一下球面上的三角形，它由三条短程线围成。如图8-5中，赤道和两条经线就围成了一个三角形。容易看出，所有的经线都与赤道垂直，三角形的两个底角之和已是180°了，再加上顶角，三内角之和肯定大于180°。

下面我们就来介绍，爱因斯坦如何把黎曼几何与他的物理思想相结合，建立起广义相对论的宏伟大厦。

第九章　弯曲的时空

1. 对新理论的构想

爱因斯坦猜测,万有引力可能是一种几何效应,可能是时空弯曲的表现。他推测,物质的存在造成了时空弯曲。由于万有引力只是时空弯曲表现出的几何效应,所以不应该把万有引力看作真正的力。单纯在万有引力作用下的质点运动,例如行星绕日运动,地球上的自由落体运动,都应该看作是不受外力的惯性运动。作惯性运动的“自由”质点,当然应该沿时空中的“直线”进行,也就是说自由质点应该沿短程线运动。

爱因斯坦觉得,建立新理论的关键是寻找两个方程。一个是物质如何决定时空弯曲的方程,他称其为场方程。另一个是不受外力的自由质点在弯曲时空中作惯性运动的方程,他称其为运动方程。

爱因斯坦在格罗斯曼的帮助下,很快掌握了黎曼几何的基本知识,并投入了寻找场方程的努力。这一工作耗费了爱因斯坦很大的精力和漫长的时间。他设想,方程的左端应该是描述时空曲率的项,右端应该是描述物质存在状态的项:

时空曲率＝物质分布

右端的物质项用时空中能量和动量的分布来表述，其形式比较容易猜测，爱因斯坦很快就写了出来。左端的曲率项的形式却很难猜想，他在格罗斯曼的帮助下尝试了两年，也没有找到正确的形式。

1915年，爱因斯坦移居德国，得以与著名数学家希尔伯特交往。他在与希尔伯特几次讨论后，当年底就写出了场方程左端的正确形式，从而得出了完整的场方程，并用此方程解释了水星轨道近日点的进动，终于建立起了他的新理论——广义相对论。

2. 爱因斯坦与希尔伯特的竞争

在广义相对论诞生前后的几个月内，爱因斯坦与希尔伯特之间产生了竞争。在与爱因斯坦的讨论中，希尔伯特对爱因斯坦的新理论产生了兴趣，他也开始寻找场方程的正确形式。希尔伯特不愧是数学大师，他很快赶了上来。在爱因斯坦把自己的最终论文投给杂志社的同时，希尔伯特也投了稿。

爱因斯坦的稿件是1915年11月25日完成并投稿的，发表于当年的12月5日。希尔伯特的稿件是1915年11月20日完成并投稿的，发表于1916年的3月1日。

希尔伯特论文的发表时间比爱因斯坦晚，但投稿时间比爱因斯坦早。应该说明的是，爱因斯坦的论文中包括了场方程的正确形式，希尔伯特的稿件中最初没有给出场方程。不过，在爱因斯坦的论文刊出后，希尔伯特在对自己稿件的清样作修改时，加上了正确的场方程。希尔伯特是在看到了爱因斯坦的论文之后，才明确写出场方程的，而且他对场方程右端物质项的理解有错误。

此外，爱因斯坦在自己的论文发表之前，就用场方程得出了水星轨道近日点进动的正确值，并写信告诉了希尔伯特，希尔伯特还回信对爱因斯坦表

示了祝贺。

虽然两人在广义相对论的发现权方面有过小的误会，但希尔伯特很快就表示：爱因斯坦是广义相对论的唯一创建人。

爱因斯坦在创建广义相对论的道路上有过多次物理思想的重大创新。他于1905年开始研究万有引力，1907年提出等效原理，1911年得出光线在引力场中弯曲的结论，1913年与格罗斯曼一起把黎曼几何引进新理论的研究。应该强调的是，猜测到万有引力是一种几何效应，是时空弯曲的表现，这一点是非常难得的。所以，爱因斯坦后来曾经自豪地说，“狭义相对论如果我不发现，5年之内就会有人发现；广义相对论如果我不发现，50年之内也不会有人发现。”

希尔伯特是在1915年才开始参与新理论研究的，他对新理论的物理本质的理解当然不如爱因斯坦，但是他与爱因斯坦的讨论，肯定对后者找到场方程的正确形式有启发和帮助，否则不会在几次讨论之后，爱因斯坦就得到了几年没有找到的场方程。

所以，虽然广义相对论是爱因斯坦一个人创建的，但是希尔伯特对他的帮助也是难能可贵的。如果没有希尔伯特在数学上的帮助，也许广义相对论的建立还要推迟一段时间。应该说明的是，他们两人由于误会产生的小火花很快就平息了，此后两人一直是要好的朋友。

3. 场方程与运动方程

爱因斯坦得到的场方程的正确形式为

$$R_{\mu\nu}-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R=\kappa T_{\mu\nu} \tag{9.1}$$

方程左端表示时空曲率，右端表示物质能量与动量的分布。式中 $R_{\mu\nu}$、R 和 $g_{\mu\nu}$都是与时空曲率有关的函数；$T_{\mu\nu}$ 表示能量、动量。常数 κ 为

$$\kappa=\frac{8\pi G}{c^4}$$

其中 G 为万有引力常数，c 为真空中的光速，π 为圆周率。从此式可以看出，κ 不是什么新常数，只是我们熟悉的常数的组合。

场方程是广义相对论的基本方程，它又称爱因斯坦方程，描述物质如何决定时空弯曲。

广义相对论的另一个重要方程是运动方程。爱因斯坦设想此方程应该表述不受外力的自由质点在弯曲时空中的运动，因为万有引力不算力，运动方程描述的应该是质点的惯性运动，当然应该沿短程线（测地线）跑。数学家们早就得出了黎曼时空中的短程线方程：

$$\frac{d^2x^\alpha}{ds^2}+\Gamma^\alpha_{\mu\nu}\frac{dx^\mu}{ds}\frac{dx^\nu}{ds}=0 \tag{9.2}$$

式中 x^α 为坐标，s 为短程线的线长。$\Gamma^\alpha_{\mu\nu}$ 称为联络，它是一个与时空弯曲有关的函数。爱因斯坦就把黎曼几何中的短程线方程引用过来，作为广义相对论的运动方程。所以，给出运动方程并没有耗费爱因斯坦多少时间。

需要说明的是，广义相对论用的几何与最初的黎曼几何有差别，本质上是一种伪黎曼几何。在伪黎曼几何中，“短程线”可能是两点间最短的一条，也可能是最长的一条。所以广义相对论中的短程线，是两点间长度取“极值”的线，它可能是两点间最短的一条线（取极小值时），也可能是两点间最长的一条线（取极大值时）。

一开始，爱因斯坦认为广义相对论的基本方程有两个，场方程(9.1)和运动方程(9.2)。20世纪30年代，爱因斯坦和苏联科学家福克，分别独立证明了运动方程可以从场方程推出，所以广义相对论的基本方程只有一个，那就是场方程。

在证明过程中，他们还得到一个副产物：在广义相对论中引力质量 m_g 和惯性质量 m_I 是同一个东西。

4. 如何理解时空弯曲

一个人手托一个物体让它不动，在牛顿力学看来，物体之所以不动，是

因为物体所受的万有引力与手托它的力相平衡,合力为零,所以它处在惯性状态(静止)。人一松手,物体就自由下落,牛顿力学认为这时物体在万有引力作用下做匀加速直线运动。

从广义相对论看来,万有引力不是力。被手托着不下落的物体只受到一个外力:人用手托它的力。它虽然静止,但由于受到外力(托力),所以并不是处在惯性状态。人一松手,物体开始匀加速下落。由于万有引力不是力,所以下落物体并未受到任何外力,它的运动属于惯性运动。所以自由落体运动是弯曲时空中的惯性运动。

牛顿力学认为,行星绕日的运动,是在万有引力作用下的变加速运动。广义相对论认为万有引力不是力,所以行星没有受到力,它的绕日运动是惯性运动。因此,行星的运动轨迹是短程线。但要注意,通常所说的行星绕日的椭圆轨道并不是短程线。椭圆轨道是三维空间中的轨道。这里说的短程线是四维时空中的曲线(世界线)。也就是说,行星绕日运动是沿四维时空中的短程线的惯性运动。如图 9-1 所示,这条短程线是四维时空中的螺旋线,此螺旋线在三维空间中的投影就是我们通常所说的行星椭圆轨道。

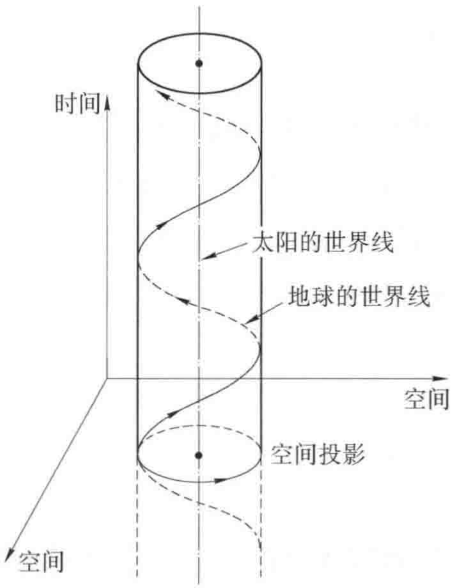


图 9-1　太阳和行星在四维时空中的轨迹

有人用床单做比方来解释时空弯曲。如果四个人各执床单的一角拉紧,床单就成为一个平直的二维空间。把一个小球放在床单上,它静止不动。一扔,它就作匀速直线运动。这就好比平直空间中的惯性运动状态(图 9-2)。

在绷紧的床单中央放一个铅球,床单就凹下去了,成为一个二维的弯曲

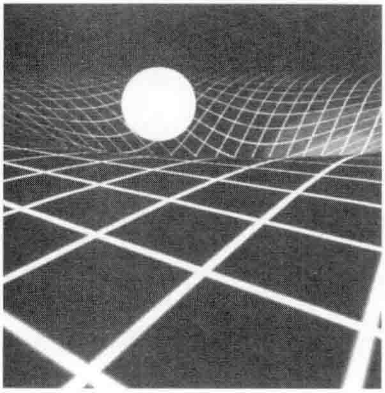


图9-2　用床单比喻弯曲时空

空间。再把一个小球放在床单上，它将不会静止，会自然地滚向铅球。我们可以把铅球看作地球，小球看作人手托着的物体，你松手后小球向铅球滚去，就好比人松手后原来手托的物体会落向地球。为什么小球会向铅球滚去呢？按照牛顿力学的解释，铅球（地球）用万有引力吸引小球（物体）。用爱因斯坦的广义相对论来解释，则是铅球（地球）的存在，让床单（时空）变弯了，在弯曲时空中，小球（物体）做惯性运动，落向了铅球（地球）。

也可把铅球看作太阳，小球看作地球。在床单上把小球横向一扔，它就会围着铅球转动，不会跑掉。为什么不会跑掉呢，地球为什么不飞离太阳呢？按照牛顿理论，这是因为铅球（太阳）用万有引力吸引着小球（地球）；按照广义相对论，则是铅球（太阳）的存在使床单（时空）变弯了，由于床单（时空）弯曲了，所以小球（地球）作惯性运动，围着铅球（太阳）转，不会逃离铅球（太阳）。

5. 引力红移——时空弯曲使时间变慢

爱因斯坦在发表广义相对论时指出，有三个可以观测的实验能够证明广义相对论正确。这三个实验是“引力红移”“行星轨道近日点的进动”和“光线偏折”。

爱因斯坦指出，时空弯曲会使时间进程变慢。时空弯曲得越厉害，时间进程越慢。太阳附近的时空比地球附近的时空弯曲度大，所以太阳附近的时钟会走得比地球上的钟慢。不信的话，你可以在太阳表面放一个钟，然后用望远镜观测，并与地球上的钟进行比较。当然，这是开玩笑的话。太阳表

面怎么放置钟，就是放置好了你也不敢用望远镜看啊，那里太亮了，眼睛根本受不了。爱因斯坦说没有关系，太阳那里原来就放着钟，这种钟就是氢原子。

大家知道，每种原子都有特定的光谱，化学家们经常通过光谱分析来鉴定化学元素。每种原子的光谱都由确定的若干根光谱线组成，每根光谱线又都有确定的频率。

爱因斯坦认为，每根光谱线都对应着原子内部特定的钟，光谱线的频率就是它对应的原子钟的频率。时间进程变慢，原子内部的钟会随着变慢，这时对应的光谱线的频率就会减小、波长就会增大，光谱线就会向光谱的红端移动，这就是光谱线的红移。

爱因斯坦预言时空弯曲会造成时间进程变慢，这样产生的红移称为引力红移。

太阳表面存在大量氢原子，广义相对论预言，由于那里的时间变慢，氢原子的光谱线将产生红移。可以观测太阳表面的氢光谱，测出其红移，并和地球实验室中的氢光谱进行比较。比较的结果与广义相对论的预言一致。

但要指出，按照牛顿理论，光子从太阳表面飞向地球，需要克服太阳引力场的势能，光子的能量 $E=h\nu$ 会减小，这也将导致光子频率 ν 减小，光谱线也会发生红移。用万有引力定律算出的红移量与广义相对论的预言值相差不大。目前的观测精度尚不能测出二者的差异。

此外，太阳表面存在称为太阳风的垂直升降气流，其产生的多普勒效应包含蓝移（上升气流引起）和红移（下降气流引起）。而且，太阳表面温度很高（6 000 摄氏度左右），氢原子热运动剧烈，杂乱的热运动也会产生多普勒效应，导致杂乱的红移和蓝移。这些多普勒效应导致的谱线移动会叠加在谱线的引力红移上，使光谱线变宽，红移量不稳定。这些都增加了观测的困难。

所以说，引力红移是对广义相对论的支持，但精度还有待提高。

6. 行星轨道近日点的进动

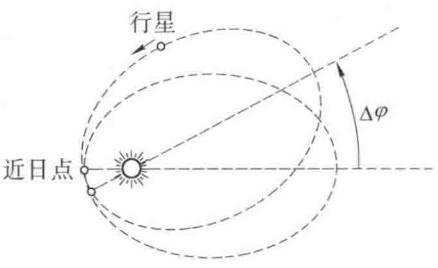


图 9-3　行星轨道近日点的进动

开普勒三定律指出,行星绕日运动的轨道是封闭的椭圆。牛顿的万有引力定律支持开普勒的结论,算出行星绕日运动的轨道确实是封闭的椭圆。但是天文观测早就发现,行星轨道并不是封闭的椭圆。这个椭圆会不断向前“进动”(图 9-3)。对轨道近日点的观测能够精确确定轨道的进动值。

离太阳越近的行星,进动效应越大,所以天文学家经常以离太阳最近的行星——水星的轨道为例,来研究轨道近日点的进动。经过长期观测,天文学家发现水星轨道近日点的进动值为每百年 5 600 弧秒,其中 5 557.62 弧秒的进动可以用太阳自转、其他行星的影响等各种天文因素的影响加以解释,还有每百年 43 弧秒的进动得不到说明。这是广义相对论诞生之前就知道的事情。

19 世纪的天文学家勒维耶,在与亚当斯分别成功预言海王星之后,又对水星轨道的这一异常进动产生了兴趣。勒维耶猜想是否存在一颗未知的、离太阳比水星还近的行星,那颗行星的存在和运动对水星轨道有影响,造成了这 43 弧秒的额外进动。他假定这颗未知行星的存在,反过来用水星轨道的进动推出了这颗星在天空的位置。他又去观测,有一次看见太阳表面有一个移动的黑点,他以为发现了这颗行星。由于这颗行星离太阳非常近,他称其为“火神星”。后来发现,那个黑点其实是个太阳黑子(太阳表面的旋风),“火神星”纯属子虚乌有。

到了爱因斯坦时代,水星轨道进动的这点偏差依然没有得到解释。爱

因斯坦知道这一情况，非常希望自己的新理论能解决这个疑难，所以他在创建广义相对论的过程中，一直注意把新理论与这个疑难加以联系。这个疑难也成为了把爱因斯坦引向正确场方程的一条线索。

找到场方程后，爱因斯坦惊喜地发现，按照广义相对论，行星绕日运动的轨道原本就不是封闭的椭圆，而是不断在进动，水星轨道近日点的进动值恰为每百年43弧秒。他简直高兴极了，忍不住写信给希尔伯特、洛伦兹等朋友，信中说："我的新理论算出了水星轨道近日点的进动值，我简直高兴极了，你们知道我有多高兴吗？我一连几个星期都高兴得不知怎样才好。"

水星轨道近日点进动的观测值，与理论计算值符合得非常好，精确度极高，因此这一实验是对广义相对论的强有力支持，牛顿理论是无论如何也解释不了这一进动值的。

7. 光线偏折

广义相对论预言，由于太阳造成周围时空的弯曲，遥远恒星的光在通过太阳附近时会发生偏折(图9－4)。

然而，按照牛顿力学，远方恒星射来的光子在路过太阳附近时，也会在太阳引力下发生偏折。不过，用牛顿理论算出的偏转角只有广义相对论算出的一半。所以，可以通过对光线偏折的观测，检验广义相对论是否正确，并对牛顿理论和广义相对论进行比较。

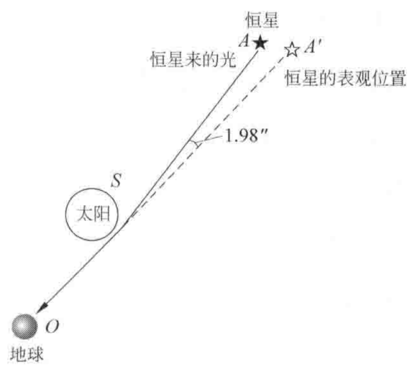


图9－4　太阳附近光线的偏折

这个实验要进行两次观测。一次是拍摄太阳背后的星空，另一次是当太阳移开后拍摄同一天区的星空，将两次拍摄的结果加以比较。比较胶片中恒星图像位置的变化，可以算出偏折角。

太阳那么亮，它背后的星空怎么拍摄？天文学家建议在日全食的时候拍。日全食时月亮把太阳完全挡住，天空犹如黑夜，群星灿烂，正好可以拍摄。那么，没有太阳的同一星空怎么拍呢？大家知道，地球绕太阳公转，半年后将转到太阳的另一侧。所以，白天太阳背后的星空，几个月后将在夜间出现，拍摄完全没有问题。

爱因斯坦的广义相对论于1915年底发表，当时第一次世界大战正在进行。1918年“一战”结束，敌对双方死了大量的人，英、德两国人民相互怨恨的情绪很强烈。这时，英国政府为了缓和英、德两国的敌对情绪，愿意拿出一笔钱来资助一些有利于增进两国人民友谊的项目。英国天体物理学家爱丁顿教授出来申请这笔钱。他说，广义相对论是德国的爱因斯坦提出来的，现在由我们英国人去做光线偏折实验，检验广义相对论，这不就能增进英、德人民之间的友谊吗？而且，1919年就有日全食，这一观测实验马上就可以做。

“一战”期间，各国政府的宣传机器都开足了马力鼓吹战争，说自己国家是正义的，对方是错误的。各国的政党、社会团体也纷纷加入战争宣传，号召本国人民全力参加战争。德国两千多名学者和社会名流发表联合声明，支持政府的战争政策，只有爱因斯坦等少数几位学者拒绝签名。他们认为这是一场强盗之间的战争，双方都不是正义的。在英国，爱丁顿与爱因斯坦的看法一致，认为这是一场非正义战争，他拒绝服兵役。英国政府十分气愤，想把他送上军事法庭，但又考虑，把这样一位著名教授送上法庭，罪名是反战，会产生对政府更不利的影响。许多人还不知道有名人反战，这样一来倒弄得全国都知道了。很多钦佩爱丁顿的人会产生疑问，他为什么反战呢？战争是不是真的不对呢？政府虽然对爱丁顿很讨厌，但权衡再三，还是没有把他送上军事法庭，也没有声张此事。

现在，爱丁顿出来要钱了，虽然有些人很烦他，不想给他钱，但考虑到此项目确实很有意义，也很能增进英、德两国人民之间的友谊，英国政府还是给了他经费。

在西非的普林西比和巴西都能看到日全食。爱丁顿率领一个观测队去了普林西比,他的助手戴森带领另一个队去了巴西。

日全食那天,普林西比正好下雨,根本看不见太阳。爱丁顿急得不得了。幸亏在日全食结束前来了一阵风,刮开了乌云,露出了群星勉强可见的星空。爱丁顿团队赶快抓紧时间,在6—8分钟内拍摄了15张照片。巴西那边天空晴朗,艳阳高照,戴森他们顺利地拍下了日全食时的星空。洗胶片时发现,阳光把底片盒晒得太烫了,胶片变了形,高兴的情绪一下子跌落下来。不过,经过仔细修正,他们最终还是获得了有用的数据。

用广义相对论算出的光线偏折角为1.75弧秒,用牛顿理论算出的为0.875弧秒。爱丁顿小组测得的偏转角为1.61弧秒,戴森小组测得的为1.98弧秒,都接近广义相对论的预言值,远离牛顿理论的预言值。所以,爱丁顿宣布,他们的观测支持了爱因斯坦的广义相对论。

这一消息传到德国时,有人问爱因斯坦有什么感想,他叼着烟斗说:“我从来没有想过会是别的结果。”

8. 关于引力波的风波

在牛顿的万有引力定律中,引力场的传播是瞬时的,引力从空间中的一点传播到另一点不需要时间,或者说引力的传播速度是无穷大。

在爱因斯坦的广义相对论中,引力场(即时空弯曲)的传播速度与真空中的光速相同,都是c。爱因斯坦很快就弄清楚了这一点。因此,作为引力源的物质如果有运动,将使周围的引力场发生变化,也即时空弯曲情况发生变化,这种变化会以光速传播到四面八方。这就是引力波。

不过,很快就弄清楚了一点:如果作为引力源的物质是球对称分布的,而且它只做球对称的膨胀或收缩,并且在胀缩过程中物质始终保持严格的球对称,那么它周围的引力场将不会发生变化,也就是说不会有引力波出现。科学家进一步认为,时空中不会存在球对称的引力波。

但是，大家认为非球对称的引力波应该存在。只要物质的运动不是严格保持球对称，就有可能产生引力波。

爱因斯坦一开始也是这样想的。但是他后来在具体研究一类物体的运动时，却算出了这类非球对称的情况竟然也不产生引力波。爱因斯坦把他们的论文投给了美国的《物理评论》杂志，这个杂志当时已是美国最重要的物理杂志，同时也是全世界最重要的物理杂志之一。按照《物理评论》杂志的审稿规定，所有的稿件都要请有关专家审查，审查通过才能发表。于是，杂志编辑部把爱因斯坦的论文寄给了一位懂广义相对论的专家，请他审阅。这位专家认真审阅了爱因斯坦的文章，认为论文有误，他写了10页的审稿意见，指出爱因斯坦论文中的错误。编辑部把审稿意见寄给了爱因斯坦。

在给爱因斯坦的信中，编辑部说："尊敬的爱因斯坦教授，我们把您的文章寄给了一位专家，请他评审。他审查后认为您的文章有错误，现把他的审稿意见附给您，供您参考。"编辑部同时指出，"在您根据审稿意见修改之前，或者您驳倒他的审稿意见之前，我们不能刊登您的文章。"

爱因斯坦一看来信，简直火冒三丈：你们也不看看我是谁，还请一位"专家"审我的稿，他能有我水平高吗？这个专家也是不知趣，居然写了长达10页的审稿意见……爱因斯坦越想越气，他没有细看审稿意见就提笔给编辑部写了回信："尊敬的编辑先生，非常抱歉，我不知道贵刊还需要审稿。我没有授权你们把我的稿件给别人看。请把稿子退还给我……"

编辑部收到爱因斯坦的信后十分震惊，爱因斯坦生气了，要退稿。这可怎么办呢？我们是按规定办事的呀！没有办法，只好把爱因斯坦的稿子退还回去，同时很有礼貌地写了一封回信："尊敬的爱因斯坦教授，我们也非常抱歉，我们不知道您不知道我们是需要审稿的……"

爱因斯坦收到退回的稿件后，余怒未消，把稿件搁置到一边，也不再看，就去研究别的问题去了。过了一段时间，爱因斯坦的老朋友英费尔德来访。爱因斯坦就把自己懒得看的审稿意见和论文一起给了英费尔德，请他看一下，发表一下意见。

英费尔德这个人水平不很高，看了一下没有看明白。他忽然想起有一位叫罗伯逊的教授正在研究宇宙论，他应该懂广义相对论，因为他研究宇宙论需要用广义相对论做工具，而且他就在此地工作。于是英费尔德会见了罗伯逊，把爱因斯坦的文章和审稿意见一起给了罗伯逊，请他看一下，发表一下意见。罗伯逊看了一会儿，就用手指着论文对英费尔德说，你看这个地方是不是有错？还有这个地方……英费尔德听他一讲，很快明白了，爱因斯坦的论文确实有错，审稿意见是对的。

英费尔德赶紧去见爱因斯坦，把罗伯逊的意见讲了一下。爱因斯坦一听，自己的论文真的有错误，于是就把论文作了修改，这一改，结论就变成有引力波了。爱因斯坦在论文的最后，表示了对罗伯逊教授和英费尔德先生的感谢。然后他把修改后的论文投给了另一本杂志。爱因斯坦还在生《物理评论》的气，不仅这篇稿没有再给《物理评论》，而且此后再也没有主动给《物理评论》投过其他稿。

《物理评论》的审稿是“背对背”的，编辑部对审稿人的信息保密，因此论文作者只能看到审稿意见，但不知道审稿人是谁，保密期限是 60 年。现在，60 年过去了，《物理评论》编辑部公布了爱因斯坦论文审稿的秘密，爱因斯坦恼火的审稿人正是他在修改稿中感谢的罗伯逊教授。

9. 到底有没有引力波

20 世纪五六十年代，美国物理学家、马里兰大学教授韦伯，曾进行引力波的探寻。他一方面用广义相对论对引力波及其探测技术做了深入研究，另一方面实际安装了两个探测引力波的装置，一个放在美国西部，另一个放在美国东部。1969 年，这两个装置同时接收到频率为 1 660 赫兹的信号，韦伯以为自己观测到了来自银河系中心的引力波。后来的分析表明，如果银河系中心有如此强的引力波辐射，银河系自身的质量早就辐射光了。而且，此后设计的比韦伯当年的仪器精密度高得多的装置，再也没有接收到类似

的信号。所以，学术界认为，韦伯观测到的信号肯定不是引力波。

此后又有人设计了不同的装置，但都没有找到引力波。一个惊喜的“突破”出现在 1978 年，在这一年举行的德克萨斯天体物理讨论会（这次会议在德国举办）上，美国天体物理学家泰勒和休斯宣布，他们通过对脉冲双星 PSR1913＋16 运转周期的观测，间接发现了引力波的存在。

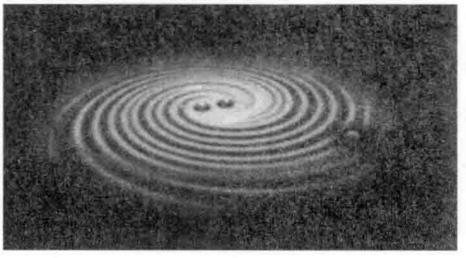


图 9－5　双星引力辐射

他们通过 4 年的精确观测发现，这对致密双星（其中至少一颗是脉冲星，即中子星）的运转周期，每年减少万分之一秒。泰勒等人假定这是由于双星运转发射引力波，引力波导致双星动能的减少，从而造成转动周期缩短。他们用广义相对论仔细计算了这对双星引力波辐射的能量，结果表明，算出的引力辐射导致的能量损失，恰好会使双星周期每年缩短万分之一秒左右，与观测结果正好相符。

泰勒作完报告后，全场掌声雷动，持续了好几分钟。这表明大多数与会学者都认为他们确实观测到了引力波。1993 年，他们由于对脉冲双星的研究获得了诺贝尔物理学奖，但颁奖词中没有明确说他们发现了引力波。这是诺贝尔奖评委会谨慎的表现，因为这对双星毕竟离我们太远，而且泰勒他们测量与计算的相对误差也还比较大。

泰勒当时公布了观测结果和计算结果，但没有公布计算引力波的具体方法和过程。1980 年，笔者正作为硕士研究生追随刘辽先生学习广义相对论，刘辽先生让我的师弟桂元星和我一起计算一下这对双星的引力辐射。他向我们建议了计算方案。经过仔细计算，我们得到了与泰勒等人一致的结果。

现在，相对论界认为，泰勒等人对脉冲星的研究结果，是对引力波的一个证明，但只是一个间接的证明。

目前，一些相对论专家和实验物理专家正在筹划对引力波的直接观测。不少人注意到引力波的一个特点：引力波的横截面的形状会发生明显的“剪切”变化。如图 9 - 6 所示，如果取一束引力波的横截面来观察，假定取的横截面是个圆面，那么它一定会变扁，而且变扁的方向会不断交替。例如，先是 BF 方向收缩，HD 方向拉伸，然后又 HD 方向收缩、BF 方向拉伸。

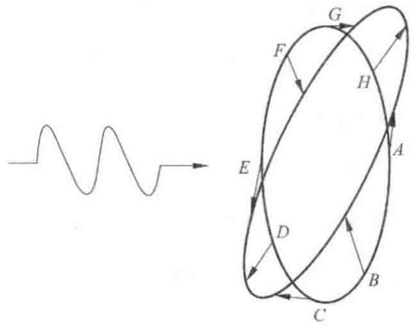


图 9 - 6　引力波的横截面示意图

一些科学家建议，可以一次发射 6 颗人造卫星，排成一个正 6 边形，如果有垂直于 6 边形的引力波射来，那么 6 边形就会在引力波的作用下，不断交替变扁，这样就可以确认引力波的到来了。

另一些科学家主张在地下挖“十”字形的沟，装上精密的光学干涉仪，如果有垂直于“十”字面的引力波到来，相互垂直的光路的光程将交替伸缩，这样也可以确认引力波的到来。他们还建议对装置抽高真空，以完成精确观测。

然而，这两个方案都需要花费巨资，而且谁也不敢打包票一定就能观测到引力波，所以这些方案都还在仔细酝酿中。

总之，重要的引力波至今尚未观测到。也有少数人认为，引力波可能根本就不存在。有关研究还在继续进行中。

10. 未解之谜：惯性力究竟如何起源

在上一章中我们谈到，牛顿认为存在一个绝对空间，惯性力起源于物体

相对于绝对空间的加速，言外之意起源于绝对空间对加速物体施加的影响。牛顿提出著名的水桶实验来论证绝对空间的存在，同时解释惯性离心力的起源（参见第八章）。

牛顿的上述观点后来遭到马赫的批判。马赫认为不存在绝对空间，所有的运动都是相对的。他认为惯性力起源于物体间的相互作用，具体来说就是起源于相对加速的物体间的一种相互作用。例如，惯性离心力起源于物体相对于全空间所有其他物体（主要是遥远星系）的转动，在这种相对转动中，遥远星系对该物体施加了作用，这个作用就是惯性离心力。马赫按照自己的观点对水桶实验作了不同于牛顿的解释。

马赫认为“不存在绝对空间，所有的运动都是相对的”，这一思想引导爱因斯坦走向了狭义相对论。马赫认为“惯性力起源于物体间作相对加速时产生的相互作用”，这一思想又引导爱因斯坦提出“马赫原理”，并最终走向了广义相对论。

所以在相对论提出后，爱因斯坦高度评价马赫的思想和作用，承认马赫思想对自己的引导，并表示他的相对论与马赫的思想一致，马赫预言的一些效应已包含在他的广义相对论中。

但马赫当时还活着，他认为相对论与自己的思想毫无共同之处，并表示坚决拒绝爱因斯坦的相对论。

此后的一些相对论专家也认为，马赫的思想虽然对爱因斯坦提出狭义和广义相对论都有启发，但他的思想与相对论也的确并不完全一致。

显然，“惯性力起源于遥远星系对物体作相对加速运动时施加的影响”，这一观点是大可怀疑的。包括电磁力和万有引力在内的各种相互作用，都不是瞬时传播的，最快的传播速度是光速。遥远星系不可能把自己的作用瞬时施加在做加速运动的物体上。

所以，惯性力既不可能起源于“子虚乌有”的绝对空间，也不可能起源于“遥远星系”，我们还是应该在加速物体的邻域去寻找惯性力产生的根源。加速物体的周围往往是真空，那在它的“邻域”又会有什么东西，可能作为惯

性力的根源呢？笔者认为，这个东西很可能就是真空本身。

加拿大相对论专家安鲁在1973年提出的一个物理效应，可以给我们重要的启示。这个效应后来被称为安鲁效应。安鲁效应指出，在一个惯性观测者看来是真空，因而什么都没有的区域，一个做匀加速直线运动的观测者将感到自己的周围充满了热辐射，辐射温度 T 与他的加速度 a 成正比：

$$T \propto a \tag{9.3}$$

既然惯性观测者认为是真空，那么加速观测者看到的热辐射（由光子及其他各种粒子组成），又是哪里来的呢？研究表明，这些热辐射来自真空的零点能。

量子论认为，真空并不是一无所有，而是不断有虚粒子对产生，然后又湮灭，这个现象叫作真空涨落。真空涨落也有能量，是能量的最低状态，这是因为没有任何状态比真空能量更少、更一无所有了。真空的这点能量称为零点能，我们平常探测不到，只能感知它的一些间接效应。

研究表明，所有惯性系，不管他们的相对运动速度如何，它们的“真空”都是相同的。所以在一个惯性观测者看来是真空的区域，其他惯性观测者，不管他们之间的相对速度如何，都会一致认为这个区域是真空。由于通常的量子理论只在惯性系中讨论，所以大家没有认识到，对于不同观测者真空有可能不等价。

安鲁的研究越出了惯性系的范围，他最先提出加速观测者的真空与惯性观测者的真空不等价。加速观测者的真空能量零点比惯性观测者的低，所以惯性真空的零点能，在加速观测者看来就成了可以直接观测到的正能量。这种能量以最简单的形式出现，那就是热辐射能（黑体辐射能）。所以匀加速观测者会认为自己周围存在热辐射。

特别值得注意的是，安鲁效应的温度 T 与观测者的加速度 a 成正比。我们知道，这个加速观测者还会受到惯性力，此惯性力也与 a 成正比。由此看来，可以把“惯性力”视作惯性的力学效应，而把“安鲁效应”视作惯性的热效应。从图9－7可以看出，二者都起源于真空能量零点的变化，所以，惯性

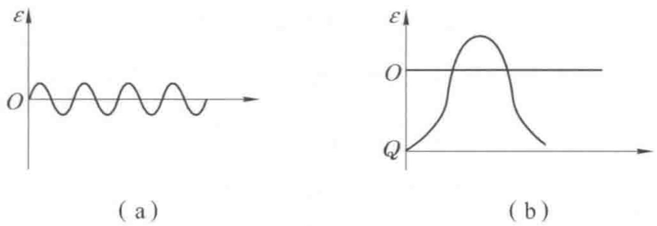
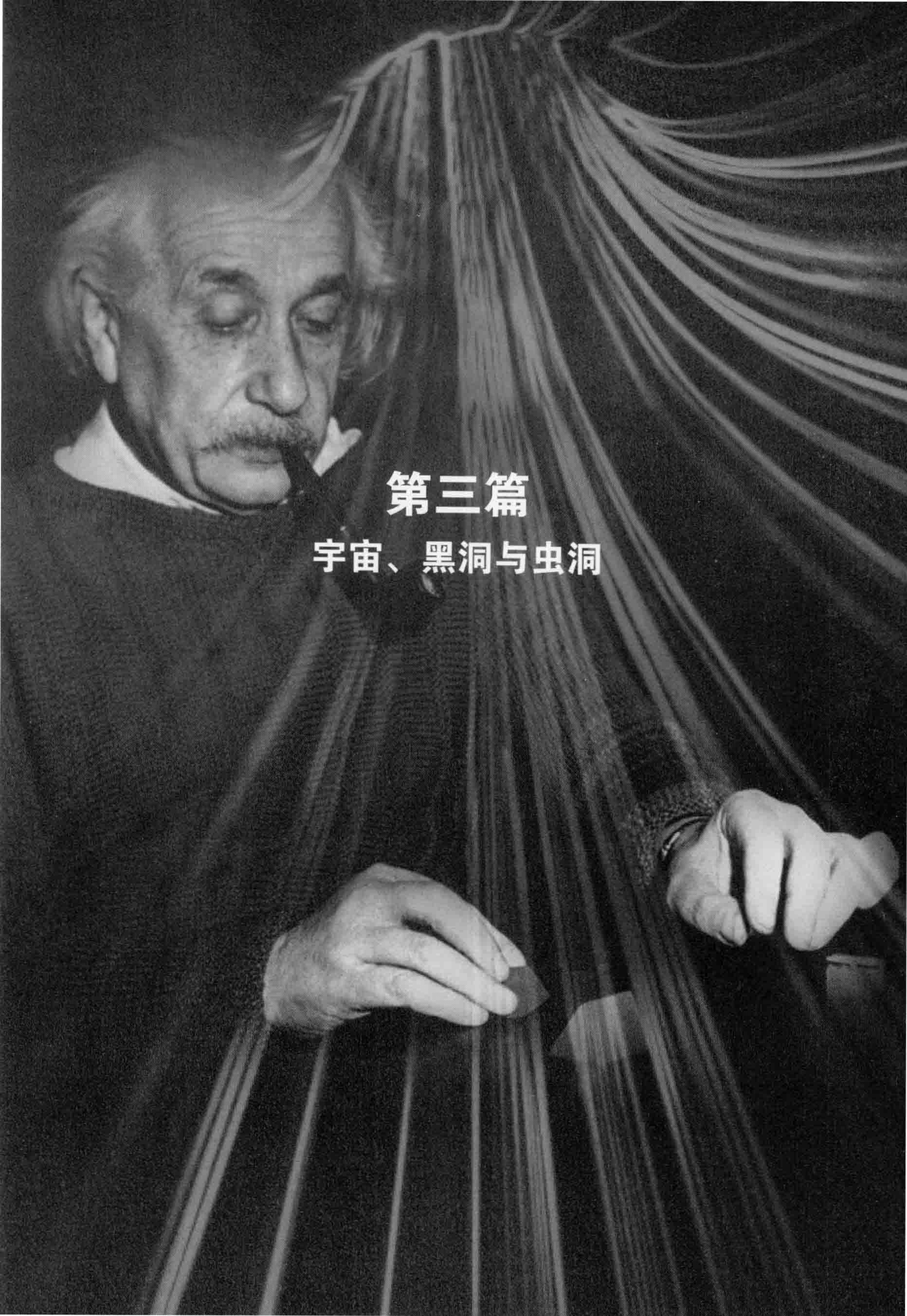


图9-7 惯性观测者的零点能(a)，加速观测者的能量零点从O下降到Q，使惯性真空的零点能以热辐射的形式显现(b)

效应可以视作“真空形变”产生的反作用。

进一步的研究还可以看到，“真空形变”源自参考系变化(惯性系到非惯性系)导致的“时间尺度”变化。感兴趣的读者可参阅拙著《弯曲时空中的黑洞》或《广义相对论基础》。



第三篇

宇宙、黑洞与虫洞

第十章 膨胀的宇宙

1. 哪里是广义相对论的用武之地

广义相对论诞生的时候，正值量子论在蓬勃发展，从玻尔的轨道量子化，到海森伯、薛定谔的量子力学，物理学家们取得了一个又一个重要进展。于是，有些人猜测，如果把广义相对论运用到量子论的研究中，也许会得到许多前所未知的新结果。

爱因斯坦认真思考后，认为在当时的实验水平下，把广义相对论运用到量子效应的研究，不可能得到任何新结果。

在那个时代，人们只知道两种力：一种是电磁力，另一种是万有引力。广义相对论是万有引力定律的进一步发展，它所描述的时空弯曲就表现为通常熟知的万有引力。当时研究的量子效应，主要是原子核外的电子运动和电子跃迁，在实验上表现为丰富多彩的光谱线和形形色色的化学反应。经过计算，不难发现，质子与电子之间的电磁力和万有引力之比，大约差 10^{37} 倍。所以与电磁力相比，原子核与电子间的万有引力完全可以忽略。不能指望广义相对论的加入，会带来任何可观测的新的量子效应。

那么,广义相对论有没有用武之地呢？爱因斯坦想到了星系和宇宙。虽然宇宙中的物质都由带正电的原子核和带负电的电子组成,但整体看来,它们是电中性的,所以恒星之间、星系与星系之间,电磁力几乎为零,起作用的主要是万有引力,那里,或许是广义相对论的用武之地。

2. 宇宙学原理

通常的物质由大量分子组成,每个分子由若干原子构成,每个原子又由原子核和许多电子组成。从小的方面看,物质似乎是成团结构的。

从大的方面看也是这样。我们的太阳系由太阳和很多行星、小行星及彗星组成,大多数行星又分别带着自己的卫星。

望远镜的观察告诉我们,银河系是由大约2 000亿颗恒星组成的。这些恒星(太阳)组成几百亿个“太阳系”。这是因为大多数“太阳系”中都有两颗以上的恒星,也就是说都有两个以上的“太阳”。像我们的太阳系这种只有一个太阳的情况是少数。由两颗恒星组成的“太阳系”称为双星系,有多个“太阳”的称为聚星系。例如北斗七星中的开阳星(图10-1),实际上就是由

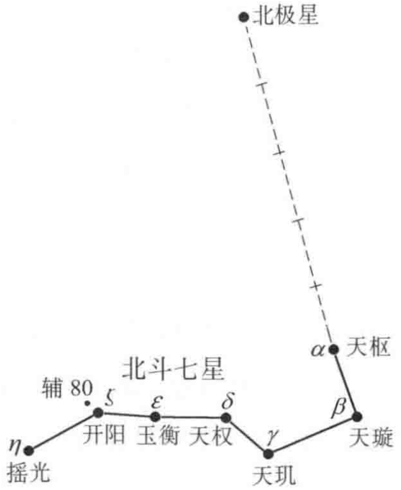


图10-1 天空中的北斗七星

六颗恒星组成的聚星(图 10 - 2)。视力好的人肉眼就可以看出,开阳实际上是两颗星(开阳与辅)。有了望远镜后,人们发现开阳本身由四颗恒星组成,辅本身由两颗恒星组成,一共是六颗星。

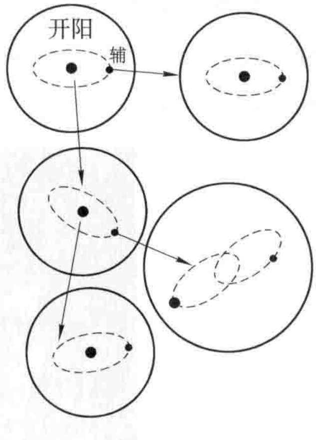


图 10 - 2　开阳与辅组成的聚星

这几百亿个太阳系都在围绕银河系的中心旋转,那里是银心,聚集着大量的恒星。如图 10 - 3 和图 10 - 4 所示,整个银河系呈盘状,形成旋涡状的结构,直径大约 10 万光年(10^5 光年)。

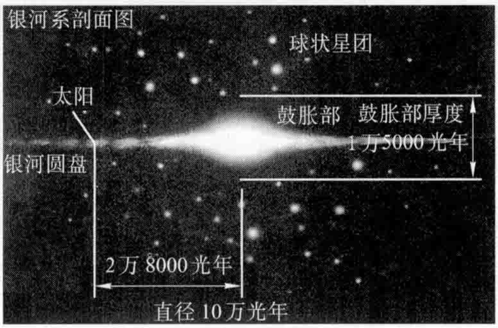


图 10 - 3　银河系的侧视图

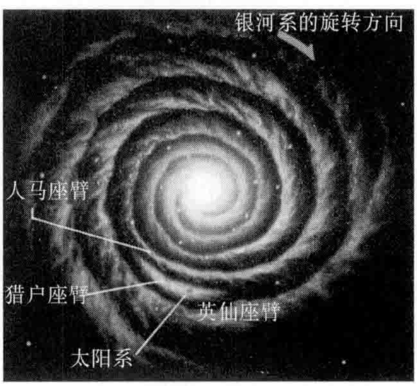


图 10 - 4　银河系的俯视图

望远镜的观察还发现，宇宙中存在大量星系（银河系），许多星系又组成星系团（星系数量少于100个的团称为星系群），每个团中的星系分别围绕它们的质心转动。星系团的直径大约为1 000万光年（10^7光年）。



图10-5 宇宙中的星系

天文观测发现，在10^7光年尺度以下，宇宙中的物质似乎都是成团结构的。但是在10^8光年（1亿光年）尺度以上，物质似乎不再形成更大的团状结构，而是均匀各向同性地分布着。也就是说，不管用望远镜朝哪个方向看，星系团的数目都是均匀分布的，不论方向，也不论远近，星系团的密度都差不多。

爱因斯坦注意到，望远镜在看远方的同时，也在看“历史”。例如，我们看距离我们4光年的比邻星，看到的是它4年前的样子；看距离我们220万光年的仙女座星系，那是它220万年前的样子；看距离我们几亿光年甚至几十亿光年的星系，看到的是它们几亿年前、几十亿年前的样子。

既然我们看到无论远近的星系团都是均匀各向同性分布的，这就说明宇宙中的星系团“过去”和“现在”都是均匀各向同性分布的，所以爱因斯坦提出“宇宙学原理”：

在宇观尺度上，宇宙中的物质始终是均匀各向同性分布的。

所谓宇观尺度，就是超过1亿光年（10^8光年）的空间尺度。这里所指的

宇宙中物质分布，指的是星系团数目的密度分布。

从这条原理不难看出爱因斯坦头脑中的宇宙图像：在 10^8 光年以下的尺度上，宇宙中的物质是成团分布的，但在 10^8 光年以上的大尺度上，宇宙中的物质（星系团数目的密度）是均匀各向同性分布的，而且始终如此。

当时的天文观测精度还不够高，还没有注意到远方星系（如距离我们几十亿光年以上的星系）与近处星系（距离我们几十万、几百万、几千万光年的星系）的差别，还没有发现远处的活动星系核，以及更远处的类星体，因而也就不容易注意到宇宙在时间上存在的差异。

3. 有限无边的宇宙

爱因斯坦觉得我们的宇宙是基本不变的。虽然恒星和星系都在不断演化，有老恒星的衰亡，有新恒星的诞生；有老星系的解体，又有新星系的形成；从局部看，宇宙的各个部分都在变化，但从整体看，宇宙中物质的分布在宇观尺度上是不变的。他认为，我们的宇宙总体是静态的，不随时间变化的，物质永远均匀各向同性地分布着。

爱因斯坦想从广义相对论的基本方程(9.1)，解出这一宇宙模型。方程(9.1)是由 10 个二阶非线性偏微分方程组成的方程组，解起来十分困难，没有一般的解法。而且，求解微分方程还需要知道“初始条件”和“边界条件”。初始条件是指这个宇宙最初的情况是什么样；“边界条件”是指宇宙的边界情况如何，如宇宙的“边”有多远，它由什么材料组成等。

在研究电磁学时我们碰到过类似问题。要知道一个大房间内的电磁场分布，它如何变化，就需要解电磁学的基本方程——麦克斯韦方程组。麦克斯韦方程也是微分方程，但这些方程是线性的，有一般解法，解起来比较容易。当然，解这些麦克斯韦方程时，也需要知道“初始条件”和“边界条件”。“初始条件”是指初始时刻这个房间内的电磁场是如何分布的。“边界条件”是指房间是否封闭，它的四壁、天花板和地板由什么材料构成，例如，是金属

还是非金属，等等。

现在，爱因斯坦已经建立了广义相对论，这个理论的基本方程就是场方程(9.1)。他已经掌握了描写宇宙的方程，但还需要给出宇宙的“初始条件”和“边界条件”。宇宙初始是什么样子，这个问题好办，爱因斯坦认为宇宙是始终不变的，初始样子和现在的样子完全一样，“初始条件”就解决了。可是“边界条件”呢？宇宙的“边”是什么样子？谁也没有见过。如果有人说宇宙的边是什么样，马上就会有人问，那么“边”的外面是什么呢？“外面”属不属于宇宙呢？这可是个不好解答的问题。

爱因斯坦确实与一般人不同，他说：“我们的宇宙是有限无边的。”“无边”，当然也就不需要“边界条件”了。

可是，怎么会既“有限”又“无边”呢？在一般人看来，有限就是有边，无限就是无边，怎么会既“有限”又“无边”呢？一张桌子，长乘宽可以得到一个有限的面积，用手去摸，很快可以摸到四条边。这是一个有限有边的二维空间(即有限大小的平面)。一个欧几里得平面，面积无限，伸展到无穷远，这是一个无限无边的二维空间。

怎么可能既“有限”又“无边”呢？爱因斯坦建议人们去思考一个篮球的球面。它的面积有限，为 $4\pi r^2$，r 是篮球的半径。但是，这个二维的球面却是无边的，一个生活于二维空间的扁片状生物，在球面上爬，永远也碰不到边(图 10-6)。这就是一个二维的有限无边的空间！

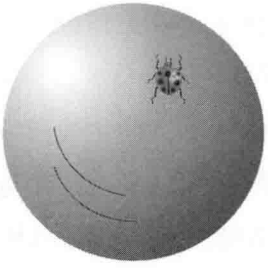


图 10-6　球面上的二维生物

现在，爱因斯坦让我们发挥想象力，设想一个三维的有限无边的空间。这个空间可不是一个实心球体，而是一个在四维时空中的三维超球面。球面是三维空间中的二维曲面，我们日常生活中就能见到。可是，四维时空中的三维超球面，谁也没有见过，只能模仿二维球面去想象。

设想有两个在这种三维超球面上生活的人，一个人坐飞船向前方飞去，另一个人留在原地不动。

如果这两个人永远不死，那么留下的人一定会等到飞船从后面飞过来。飞船不用转弯，就可以绕超球面一周转回来。

4. 宇宙项

在解决了初始条件和边界条件造成的疑难之后，爱因斯坦开始全力以赴去求解他的场方程(9.1)。没有想到的是，无论怎样尝试，都求不出这个不随时间变化的有限无边的宇宙模型。后来，爱因斯坦终于明白了。广义相对论的场方程本质上是万有引力定律的发展，场方程中只含吸引效应，不含排斥效应。一个只有“吸引作用”，没有“排斥作用”的宇宙，根本不可能达到力学平衡，不可能不随时间变化。

要得到不随时间变化的(静态的)宇宙模型，必须在场方程中引入排斥效应。于是他在方程(9.1)中增加了一项，把它改写为：

$$R_{\mu\nu}-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R+\Lambda g_{\mu\nu}=\kappa T_{\mu\nu} \tag{10.1}$$

这一项被称为“宇宙项”，其中的 Λ 是一个常数，称为“宇宙学常数”，$g_{\mu\nu}$ 是一个函数。

当年探索场方程(9.1)的形式时，爱因斯坦就知道 $\Lambda g_{\mu\nu}$ 这种形式的项会产生排斥效应。他当年不需要“排斥”，太阳系中似乎没有看到“排斥”效应的存在，所以他当时没有把这样的项放到(9.1)式中。现在，需要引进“排斥”效应了，他立刻想到了当年放弃的东西，于是重新在(9.1)式中加入了这样的项。所以，爱因斯坦引进宇宙项并没有耗费太多精力。

加入宇宙项后，爱因斯坦很快从新的场方程(10.1)中解出了静态的有限无边的宇宙模型。

当时，整个舆论界都沸腾了，“我们伟大的爱因斯坦，在发表狭义相对论和广义相对论之后，又算出了我们宇宙的形态”“整个宇宙都被他弄清楚了，爱因斯坦实在太伟大了！”

5. 弗里德曼解——膨胀的宇宙

正当全世界都在为伟大的爱因斯坦欢呼时，1922 年，一家杂志社转给爱因斯坦一篇论文，请他审稿。这篇论文是苏联数学家弗里德曼写的，他从爱因斯坦原来的方程(9.1)，即不带宇宙项的场方程，求出了膨胀的宇宙模型，或者脉动的宇宙模型，也即一胀一缩，胀缩交替的宇宙模型。

弗里德曼模型分三种情况，一种是有限无边的宇宙，它先膨胀，胀到一个极大状态后又转为收缩。即所谓脉动的宇宙。

另外两种情况，宇宙都是无限无边的，都会永远膨胀下去。

爱因斯坦认为弗里德曼的论文错了。他认为自己已经解决了宇宙形态的问题，宇宙是有限无边的，不随时间变化的。爱因斯坦认为这个问题自己已经搞清楚了，弗里德曼的工作没有意义，所以他建议杂志社不要刊登这篇错误的论文。

由于审稿是“背对背”的，弗里德曼只知道审稿人否定了自己的稿件，并不知道审稿人是爱因斯坦。正好当时有一位苏联科学家到德国访问，在宴会上碰到了爱因斯坦。爱因斯坦在席间谈到了弗里德曼的稿件，以及自己的审稿意见。这位苏联学者回国后，把这一消息告诉了弗里德曼。于是，弗里德曼写了一封信给爱因斯坦，申诉自己的稿件并无错误，但一直没有收到爱因斯坦的回信。弗里德曼只好把自己的稿件投给了德国的一个小的数学杂志，该杂志在物理学界和天文学界没有什么影响，所以弗里德曼的工作虽然发表了，却没有受到同行的关注。

爱因斯坦逝世后，有人从他的收发信件中发现了弗里德曼的信件。这封信确实寄到了爱因斯坦的办公室，没有中途丢失。但不知道爱因斯坦本人是否看过这封信。由于当时爱因斯坦已名气很大，每天都会收到大量来信，他不可能每封信都亲自读过，许多信只能由秘书、同事、朋友或家人代读。

6. 爱因斯坦的“最大错误”

1927年,比利时神父勒梅特,用带宇宙项的爱因斯坦场方程(10.1)式,也得出了膨胀的或者脉动的宇宙模型。注意,弗里德曼解的是不带宇宙项的场方程(9.1),勒梅特解的是带宇宙项的场方程(10.1)。两人解的方程不同,却得到了类似的膨胀或脉动的宇宙模型。

求解场方程是十分困难的事,这位神父不简单,居然能解场方程。

这篇论文的审稿人不是爱因斯坦,文章顺利地刊登了出来。不久后的1929年,美国天文学家哈勃得到了著名的哈勃定律,这条定律表明,当前的宇宙确实在膨胀,宇宙不是静态的,是动态的。在事实面前,爱因斯坦承认了宇宙膨胀的事实,并主动谈到了弗里德曼此前完成的,被自己错误否定了的膨胀宇宙模型。

爱因斯坦公开承认了自己的错误,宣布放弃自己的静态宇宙模型,认为宇宙确实是膨胀的,或者脉动的。

同时,爱因斯坦宣布放弃场方程的宇宙项,认为广义相对论的正确方程是原来的不含宇宙项的(9.1)式,自己后来给出的带宇宙项的(10.1)式不对,希望大家忘记(10.1)式,以后研究广义相对论时都用(9.1)式。

可是,他说让人们忘记,人们就能忘记了吗?不少人觉得也许(10.1)式是对的,还是应该有宇宙项。而且,多一个方程就多一些写论文的机会,(9.1)式与(10.1)式差别不大,求解的方程也没有太大的差别。如果有人解了其中一个,就可以很容易模仿着解另一个,碰不到多大困难就可以完成一篇新论文。所以,此后这两个方程在广义相对论研究中都有人用,有的人甚至两个都用。

宇宙项就像《天方夜谭》的一个故事中,渔夫从钓起的瓶子里放出的魔鬼一样,再也塞不回去了。

爱因斯坦对此感到十分遗憾。他说:“引进宇宙项可能是我一生中所犯

的最大错误。”

7. 勒梅特的“宇宙蛋”

勒梅特神父是神职人员，他必须面对一个问题。《圣经》上说宇宙和人类都是上帝创造的，可你说宇宙是膨胀或脉动的，你的观点能与“上帝创造宇宙”的观点协调吗？

勒梅特解释说，上帝当初创造出来的宇宙，并不是今天这个样子。上帝最初创造的宇宙是一个“宇宙蛋”，大概有乒乓球那么大，而且是个“热蛋”，温度很高。后来这个“蛋”逐渐膨胀，不断降温，渐渐演化成了今天的宇宙。

注意，勒梅特神父提出了一个重要的思想——“宇宙是演化的”。

人类在研究生物时，先是搞植物分类、动物分类。详细的分类，标志着生物学发展到一定水平。后来，达尔文和华莱士提出“进化论”，造成了生物学的革命。

再后来，人们认识到人类也是进化的。人类是从类人猿进化而来的，类人猿则是从更为原始的生物进化来的。如果真有上帝，他创造的也不应该是今天的人类。

人们也已经注意到，地球是不断演化的。地质学家一开始也是在研究各种岩石、各种矿物，搞分类。后来他们的思想也产生了飞跃，认识到地球是在不断演化的，在演化的不同时期产生了各种岩石、矿物。

所以，认识到事物在演化，是一种进步，是一种伟大的进步。

不过，勒梅特所说的“热蛋”胀大变冷，只是一种表观的描述，没有涉及更深刻的科学本质。对这一问题，做出革命性创举的是核物理学家伽莫夫。

8. α、β 与 γ 的火球模型

伽莫夫是苏联的大学生，与朗道一起被派往西欧学习。后来朗道回国

了,伽莫夫没有回去,留在了西方,他学的是核物理。

伽莫夫想,勒梅特的“宇宙蛋”会不会是一个核火球啊? 宇宙蛋的高温会不会是核反应引起的啊? 他越想越觉得自己的看法有道理。

于是,伽莫夫指导自己的研究生钻研这个问题。伽莫夫是个很爱开玩笑的人,他注意到了这位研究生的名字是阿尔法,很像希腊字母 α,自己的名字又有点像希腊字母 γ,正好他们研究所还有一位姓名很像 β 的核物理学家。于是 γ 把 β 找来,建议他们三个人一起研究火球模型。

不久,α、β 与 γ 的“原始火球模型”就建立起来了。贡献主要是 γ 与 α 做出的,β 其实贡献不太大。

这个模型认为,我们的宇宙最初是一个高温的核火球,进行着激烈的核反应,后来火球逐渐胀大、降温,主要的核反应逐渐停止,各种物质相继形成,终于演化成我们今天的宇宙。

他们的火球模型一开始就受到不少人批评。著名天体物理学家霍伊尔不同意他们的观点,讥讽他们的模型为“大爆炸模型”。意思是:按照你们的观点,宇宙一开始简直就是一场大爆炸,干脆叫大爆炸模型算了。没有想到,以后这个名字就叫下来了。“大爆炸模型”这个称呼比“火球模型”更为著名。

霍伊尔认为,随着宇宙的膨胀,不断有物质从“虚无”中产生,宇宙中物质的密度基本保持不变。宇宙不存在高温时期,早期宇宙和今天的宇宙相差不大。霍伊尔的宇宙模型称为“稳恒态模型”。

霍伊尔是水平极高的天体物理学家,他解决了恒星演化过程中,氦元素如何聚变生成碳元素的难题。

那么,究竟是“大爆炸模型”对呢? 还是“稳恒态模型”对呢? 伽莫夫说,有三个观测证据,能够判定我们的模型是正确的,那就是“哈勃定律”“氦丰度”和“大爆炸的余热”。

9. 哈勃定律

天文学家注意到，河外星系（即我们银河系之外的其他银河系）发出的光，绝大部分颜色会偏红，也有个别几个颜色偏蓝。这就是说，河外星系中任何一种元素的原子发射的光谱线，与地球上同种原子的光谱线相比，谱线的波长都有变化。绝大多数河外星系的光谱线波长变长，向红端移动，通常称为红移。个别星系原子的光谱线，波长变短，发生蓝移。为什么会出现这种情况呢？天文学家认为是多普勒效应造成的。

一个站在铁路边的人，会觉得迎面而来的火车汽笛声很尖锐，离自己远去的火车汽笛声就变得不刺耳了。这是声学多普勒效应的表现。迎面而来的声源，其声音频率增高；离我们远去的声源，其声音频率降低。

光学也有类似的多普勒效应。当光源向我们运动过来的时候，光的频率会增高，波长会变短，也就是光谱线会发生蓝移；当光源远离我们而去时，光的频率会降低，波长会变长，光谱线发生红移。

河外星系的红移，表示这些星系在远离我们。蓝移则表示相应的星系在向我们靠近。天文观测发现，绝大多数河外星系都表现出红移。蓝移的星系只有几个，而且都离我们比较近，和我们的银河系属于同一个星系群。我们银河系所在的这个星系群称为“本星系群”。“本星系群”之外的其他星系群和星系团中的星系都表现出红移，而且离我们越远的星系，红移量越大。这似乎表明，绝大多数星系都在远离我们，而且离我们越远的星系，逃离越快。

美国天文学家哈勃通过反复观测确认，河外星系的红移量与它们离我们的距离成正比。如果认为红移是多普勒效应造成的，则可以得到一条定律：河外星系远离我们的速度 v，和它们离我们的距离 D 成正比

$$v = HD \tag{10.2}$$

哈勃用他的姓的第一个字母 H 来表示比例常数，称为哈勃常数。这条定律称为哈勃定律。

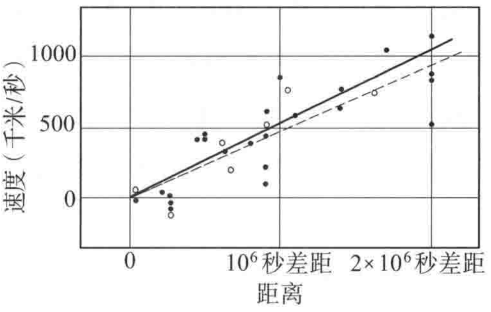


图 10－7　哈勃最早给出的观测结果（1 秒差距＝3.26 光年）

伽莫夫认为，哈勃定律支持自己的“火球模型”，是宇宙膨胀的有力证明。

10. 氦丰度

伽莫夫等人认为，宇宙诞生初期，只有一种元素——氢。由于宇宙初期温度极高，在高温下氢原子核会通过热核反应聚合成氦原子核，整个宇宙呈现为一个核火球。随着宇宙的膨胀，火球温度逐渐降低，降低到一定程度，热核反应就停止了。他们通过计算得出，当热核反应停止时，大约已有百分之二十多的氢元素聚合成了氦元素。所以他们认为，宇宙中氦元素的含量应该占全部物质的百分之二十多，其余的基本上是氢元素。氦在宇宙物质中所占的比例称为氦丰度。后来的天文观测表明，宇宙中物质的氦丰度确实是百分之二十多。

霍伊尔的“稳恒态模型”中，宇宙不存在高温时期，因此“稳恒态模型”不能很好地解释宇宙物质何以有这样的氦丰度。因此，氦丰度的观测值支持了伽莫夫的“火球模型”。

应该说明的是，冷却下来的由氢和氦组成的气体，在演化过程中会逐渐聚集成团。这些巨大的气团在万有引力作用下收缩，大量的引力势能转化成热能，气团温度逐渐升高。大的气团的中心温度会升高到上千万度，甚至

上亿度，而且气团中心区域压强极高，这样的物理条件会重新点燃氢聚合成氦的热核反应，使气团变成发光发热的恒星，例如我们的太阳。这些恒星中会不断有新的氦生成。不过，研究表明，恒星内部热核反应生成的氦，比宇宙初期生成的氦少得多，影响可以忽略不计，基本不会改变宇宙中物质的氦丰度。

11. 大爆炸的余热

伽莫夫等人认为，虽然宇宙在膨胀过程中温度会下降，但整个宇宙的温度不会降低到绝对零度。他们认为当今的宇宙还应该存在大爆炸的余热。经过计算，余热的温度大概在绝对温度 5 K 左右。

有少数相信大爆炸宇宙学的天文学家开始有意识地寻找大爆炸的余热，但一直没有找到。长时间来，各方面的天文观测也没有发现可能和“余热”有关的任何蛛丝马迹。

1964 年，终于有了突破性的发现。美国射电天文学家彭齐亚斯和威尔逊无意中发现，宇宙中存在温度 2.7 K 的各向同性的微波背景辐射。这种辐射的能谱表现为普朗克的黑体谱。黑体谱是热辐射的标志，因而可以用温度来刻画。不过，这一辐射的波长很长，处在微波波段，所以被称为微波背景辐射。

他们公布了自己的发现，但没有对此辐射的物理根源作出解释。正在寻找“余热”的相对论专家迪克立刻意识到，彭齐亚斯和威尔逊发现的 2.7 K 的微波背景辐射，正是自己希望找到的大爆炸余热。

大爆炸的余热终于发现了，天文观测强有力地支持了 α、β、γ 的“火球模型”。霍伊尔的“稳恒态模型”对微波背景辐射不能作出自然而合理的解释。从此，“大爆炸宇宙学”压倒了“稳恒态宇宙学”，成为了宇宙演化理论中的主流学说。

彭齐亚斯和威尔逊由于对微波背景辐射的发现，获得了诺贝尔物理学

奖。首先指出这一辐射的本质是大爆炸余热的相对论专家却没有得到。

12. 无意中的重大发现

彭齐亚斯和威尔逊是在研究射电天文学时，无意中作出这一发现的。

当时他们设计了一个无线电装置，准备搜寻来自宇宙空间的无线电波。仪器安装好后，他们开始调试，想在正式开展探测工作之前，把装置调整到尽可能好的工作状态。

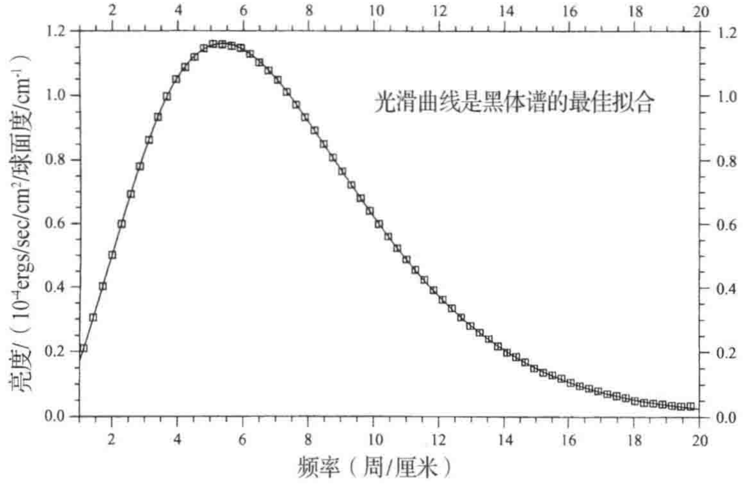


图 10－8　观测到的微波背景辐射曲线

调试的重点是降低仪器的噪音。然而，噪音降低到一定程度后，就再也降不下去了。他们不甘心就用这种状态的仪器开展工作，于是把整个仪器拆开做了重新检查。彭齐亚斯和威尔逊发现，鸽子在装置的核心部位筑了一个窝，还拉了一堆鸽子粪。他们觉得找到了噪音的根源，赶快把鸽子窝拆掉，清洗了鸽子粪。在他们的论文中，对整个过程做了具体描述。不过，为了文雅起见，他们没有说发现鸽子粪，而是说发现了一堆鸽子的白色分泌物。

把装置弄干净后，他们再次对仪器进行调整，令人意外的是噪音依然存

在,而且基本上没有再减弱。彭齐亚斯和威尔逊终于认识到,他们观测到的“噪音”并不是仪器本身造成的,而是宇宙空间固有的、普遍存在的信号。于是,他们公布了这一发现。也许,一开始他们并没有意识到自己的发现如此重要,对宇宙学会产生如此重大的影响。

第十一章　膨胀宇宙释疑

1. 大爆炸之前没有时间

在哈勃定律、氦丰度和微波背景辐射三个观测证据的支持下，“大爆炸模型”被学术界普遍接受了。不过，人们还有不少疑问。

一个常常碰到的问题是：在大爆炸发生之前，宇宙是什么样子？这个问题的提出，源于一种误解，以为在大爆炸之前时间已经存在。实际上，在大爆炸之前根本没有时间，时间是从大爆炸那一刻，与物质一起从无到有创生出来的。

有人会想，科学家真聪明啊，居然会想出时间是“创生”出来的，在创生那一刻(即大爆炸开始的那一刻)之前，根本不存在时间。也就是说，对于那一刻，不存在“以前”。

其实，认为在“创世”那一刻之前不存在时间，时间是与万物一起“创生”出来，并不是科学家首先提出来的，而是神学家首先想出来的。

中世纪的时候，一些对《圣经》和基督教有怀疑的人，特别是一些反对基督教的人，常常会向主教、神父们提一些怪问题，用难为神职人员的方式来表达自己对宗教的怀疑和反对。有的人故作天

真地向主教、神父发问:“上帝在创造世界之前,在干什么呢?”这可是个不好回答的问题,《圣经》上没有说,胡乱答一下又会被抓住其他的辫子。

这时,一位杰出的神学家、思想家圣·奥古斯丁想出了这个聪明的答案:上帝处在时间之外,他在创造世界的同时创造出时间,“创世”之前根本没有时间,所以也就不存在“以前”。

今天,科学家们沿用了圣·奥古斯丁的观点,把他的这一思想用到了科学的宇宙论之中。

2. 大爆炸之前没有空间

现代宇宙学认为,大爆炸发生之前,不仅没有时间,也没有空间。空间是与时间、物质一起在大爆炸中从无到有创生出来的。

一提到大爆炸宇宙学,许多人头脑中会有这样的图像。他们以为在“爆炸”发生前,已经存在空间和时间。所谓大爆炸,就是在空间某一处有一块高密度的物质爆炸了,或者完全无中生有地在空间某一点崩出物质来了。那里密度和压强都很大,周围一无所有的空间则密度为零。然后物质在空间中扩散开来,逐渐充满整个宇宙,空间各处的密度和压强也趋于相等。按照这样的图像,时间、空间先于物质而存在,而且大爆炸发生在空间的某一点,那一点就是大爆炸的中心(见图11-1的上图)。这种图像是错误的。

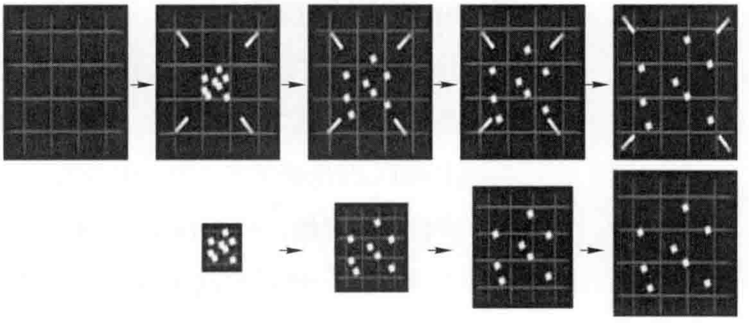


图11-1　对“大爆炸”的错误(上图)与正确(下图)理解

正确的图像如图 11－1 的下图所示，在大爆炸之前没有空间，空间和时间都是与物质一起从爆炸中创生出来的。因为爆炸发生前根本不存在空间，所以大爆炸没有中心，此后的宇宙膨胀也没有中心。创生之后，空间不断膨胀，物质的密度随着空间膨胀而降低，但对于任何一个确定的时刻，空间各点的密度都是相等的，物质始终均匀地分布着。

3. 大爆炸没有中心

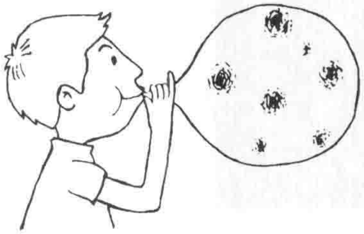


图 11－2　吹气球的小孩

有人用膨胀的气球来说明宇宙膨胀。如图 11－2 所示，一个小孩在吹气球。气球的球面代表一个二维空间，上面的墨水点就好比一个个星系。气球膨胀时，生活在任何一个墨水点上的二维生物，都会觉得其他的墨水点（星系）在远离自己。我们的三维空间膨胀与气球面所示的二维空间的膨胀完全类似。这个图像很好地比喻了宇宙膨胀，直观地告诉我们，膨胀没有中心，或者说空间的任何一点都是膨胀的中心。

4. 宇宙学红移不是多普勒效应

哈勃认为，哈勃定律描述的宇宙学红移是多普勒效应的表现。此后许多年，人们也一直认为宇宙学红移属于多普勒效应。然而近年来的研究表明，宇宙学红移其实不属于多普勒效应。

多普勒效应是空间本身不变化，光源相对于观测者运动而造成的。而宇宙学红移则是空间本身膨胀造成的，作为光源的远方星系，以及观测者所处的地球，在空间的位置并没有动。星系与地球在空间的位置，用图 11－3 中的格点来表示。从图 11－3 的右图可以看出，星系与地球没有作相对运

动，只是格子变大了，因而它们的距离在拉开。

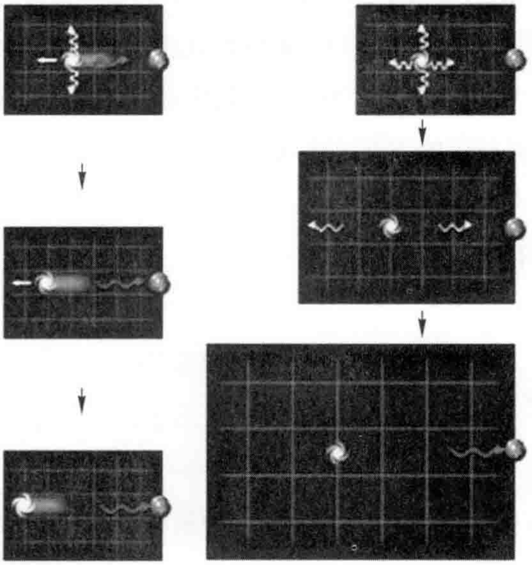


图 11-3　宇宙学红移(右)不是多普勒效应(左)

图 11-3 的左图表示的是，假设宇宙学红移是多普勒效应的情况。空间本身没有膨胀，格点距离没有拉大，远方星系在远离地球“运动”。这时地球上的观测者会看到红移，光的波长在离开星系那一刻，已经增大了，已经发生了红移。如果这个图像是正确的，那么位于星系另一侧的外星人将看到星系向它们飞来，光谱线应该发生蓝移。如果真是这种情况，四面八方的远方星系，不可能在我们看来都表现出红移，除非我们这里是膨胀的中心。然而上文已经谈到，宇宙的膨胀没有中心，认为我们这里是膨胀中心的想法是荒谬的。

图 11-3 的右图正确反映了宇宙膨胀。光线在脱离星系时，波长没有变化，红移没有产生。波长是在空间膨胀(格点间距离增大)过程中逐渐拉大的。也就是说，光谱线的红移是随着空间膨胀而出现的。另外，按照这一正确图像，位于星系另一侧的外星人也将看到红移，位于宇宙中任何一处的人，都会看到远方星系均发生红移。这正是我们今天观测到的情况。

需要说明的是，位于我们的本星系群中的那几个光谱线发生蓝移的星系，它们的蓝移确实是多普勒效应造成的。本星系群中的星系，围绕共同的质心转动，向我们星河系飞来的星系，表现出多普勒效应的蓝移，作远离我们运动的星系，表现出多普勒效应的红移。

总之，本星系群中的那些河外星系的红移和蓝移，都是多普勒效应的表现。本星系群之外的河外星系都只表现出红移，而且遵从哈勃定律，离我们越远的红移越厉害，这种宇宙学红移，不是多普勒效应造成的，而是空间膨胀造成的。

由于空间膨胀是广义相对论的结论，是时空弯曲的一种动力学效应，所以宇宙学红移本质上属于“引力红移”。

5. 星系的“退行速度”可以超光速

另一个有趣的问题是，既然按照哈勃定律，离我们越远的星系“逃离”我们的速度越快，那么它们的“退行速度”可以超过光速吗？

狭义相对论认为光速是极限速度。任何静质量不为零的物体，其运动速度都只能趋近真空中的光速，不可能达到光速，更不可能超过光速。只有静质量为零的粒子（例如光子、中微子等），运动速度正好是光速，但也不可能超过真空中的光速。如果出现物体或信号的超光速运动，将会使因果关系倒置。所以，狭义相对论严格禁止超光速运动。

不过，狭义相对论不允许超光速，是针对物体运动速度和信号传播速度而言。不属于物体真实运动的表观速度（例如“视运动”），以及不能传递信号的速度（例如波的相速度等），并不在禁戒之列。

下面我们将看到，哈勃定律描述的远方星系的“退行速度”，也不在狭义相对论的禁戒之列。这是因为，这些星系的“退行速度”并非它们在空间中的运动速度，而是空间膨胀造成的“视速度”。从图 11 - 4 可看出二者的区别。

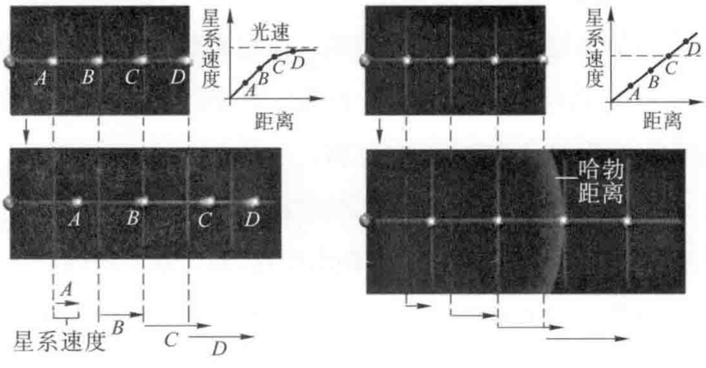


图11-4 河外星系的退行速度可以超光速(左:错误;右:正确)

图11-4中左图设想的情况是,空间本身不变化,星系在空间中运动,这种运动是受限于狭义相对论的,不能超过光速,所以远方星系的“退行速度”只能趋近光速,不能达到光速。不过,此图设想的情况是错误的。

哈勃定律描述的宇宙学红移不是这种情况。宇宙膨胀反映的真实情况并不是河外星系在空间中做逃离运动。星系在空间的位置并没有变化,这一点从图11-4右图中星系在格点上的位置不变可以看出来。宇宙学红移完全是空间膨胀的结果。从11-4右图可以看出,格子在胀大,格点间的距离在拉大。在宇宙膨胀中,星系根本没有运动,红移完全是空间本身膨胀造成的。星系“退行速度”并非物体的运动速度,不在狭义相对论的禁戒之列,所以星系的“退行速度”可以“超光速”。

6. 能看见超光速退行的星系吗

既然远方星系的退行速度可以超过光速,那么我们似乎应该看不见这些“超光速”远离的星系。

科学家们把星系“退行速度”恰好等于光速的距离称为“哈勃距离”。从(10.2)式不难算出哈勃距离 D,

$$D=c/H \tag{11.1}$$

式中 c 为真空中的光速。如果哈勃常数是一个严格的常数，我们将不可能看见那些超光速退行的星系，从图 11－5 的左图不难看出这一点。此图显示在哈勃距离之外的一个星系向地球发出一个光子，光子以光速飞向地球，但空间膨胀效应又使它超光速远离，远离速度超过它奔向地球的速度，所以我们不可能观测到它。

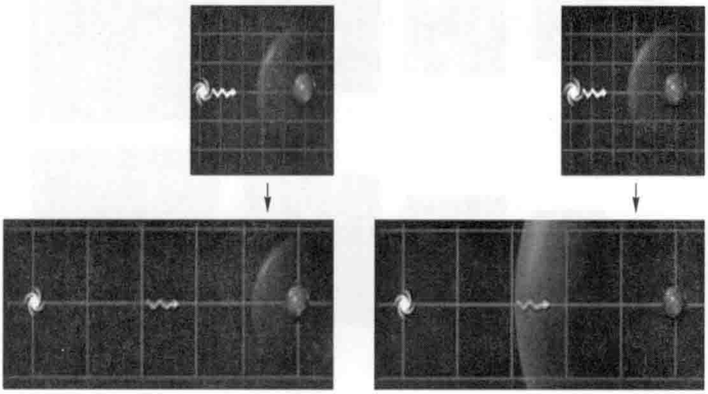


图 11－5　为何能看见退行速度超过光速的星系（左：错误；右：正确）

但是，天文观测发现，哈勃常数并非严格的常数，它随时间变化，越来越小。所以，今天的天文学家把哈勃常数改称“哈勃参数”，只把今天的哈勃参数仍称为哈勃常数。

由于哈勃参数随时间增长而减小，所以哈勃距离随时间增长而增大。图 11－5 右图反映的正是这种情况。不难看出，当哈勃距离增大到把光子包进来之后，这个光子就可以到达地球，被我们观测到了。所以，我们能够观测到退行速度超过光速的远方星系。

7. 我们自己是否在膨胀

一个有趣的问题是，既然宇宙在膨胀，我们的银河系、太阳系、地球，甚至我们自身是否都在膨胀？

如果我们自身随着宇宙一起膨胀，而且按照相同的比率膨胀，分子、原子都在膨胀，尺子本身也膨胀，那我们就根本发现不了宇宙膨胀了。图11-6的上图描述的就是这种情况。当然，这是错误的。

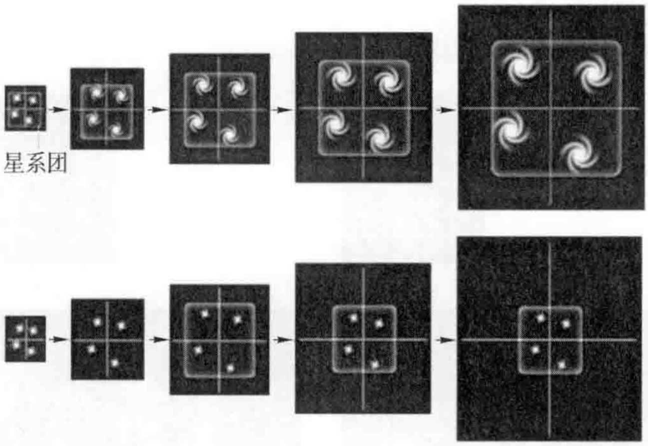


图11-6　宇宙中的各种物质是否都在膨胀（上：错误；下：正确）

真实情况如图11-6下图所示，在宇宙诞生的初期，的确所有的物质包括基本粒子都在膨胀。但是当宇宙膨胀到一定程度时，物质间万有引力的吸引效应开始发挥作用，所以我们的本星系群不再膨胀，群中的所有星系，包括我们的银河系也不再膨胀，银河系中的所有恒星、行星、分子、原子都不再膨胀，我们人体，我们的尺子，也都不再膨胀。不过各星系团（群）之间的引力效应不能阻止“团”间距离的拉大，所以各星系团仍在相互远离，宇宙仍在膨胀。由于我们自身不再膨胀，尺子不再膨胀，因此我们能够通过观测发现宇宙在膨胀。

8. 宇宙未来将如何演化

弗里德曼和勒梅特的宇宙模型都指出，宇宙未来的演化有三种可能性，如图11-7所示。图中横坐标 t 表示时间，纵坐标 $a(t)$ 是宇宙的尺度因子。

粗略地说，$a(t)$反映宇宙三维空间的尺度大小。

一种情况，宇宙是脉动型的，膨胀到一定程度会转变为收缩。这种宇宙的三维空间曲率 K 是正的，体积是有限的，是有限无边的宇宙。在“有限无边”这一点上，“脉动”宇宙与爱因斯坦的“静态”宇宙是一样的，只不过脉动的宇宙在“动”，“静态”宇宙则不随时间变化。

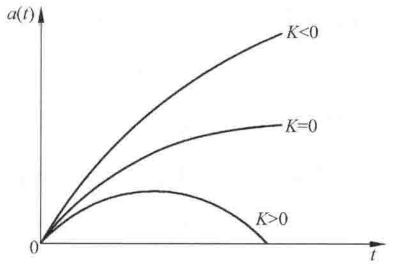


图 11－7　宇宙的可能未来

实际上，爱因斯坦的静态宇宙是脉动宇宙的特殊情况。也就是说，爱因斯坦的静态解包含在勒梅特的脉动解之中，描述的是宇宙项的排斥效应与万有引力的吸引效应恰好抵消的特殊情况。不过，这种情况是不稳定的，稍有扰动，静态的宇宙就不再静态，变成膨胀或脉动的宇宙。

应该说明，爱因斯坦的静态模型不包含在弗里德曼模型之中。这是因为弗里德曼的模型中不含宇宙项，不存在排斥效应，宇宙不可能处于吸引与排斥的平衡点，因而他得到的宇宙模型都是“动”的，不含“静”的情况。

脉动的宇宙在转化为收缩后，体积会越来越小，温度会越来越高，重新化为核火球。目前，比较流行的看法是，脉动宇宙在收缩到一定程度时会发生“反弹”，再次转入膨胀。所以，这样的宇宙会不断胀缩交替，像脉搏跳动一样，这就是称它为脉动宇宙的原因。

弗里德曼和勒梅特得到的第二类和第三类宇宙模型都不会转化为收缩，都将永远膨胀下去，温度会越来越低，趋向绝对零度。这两类宇宙三维空间的体积都是无穷大。不同的是，其中一种的空间曲率 K 为零，也就是说三维空间是平直的，是平直的无限无边的宇宙。另一种的空间曲率 K 为负，即三维空间的曲率是负的，是负曲率的无限无边的宇宙。

让人特别难以理解的是，这两种无限无边的宇宙，从诞生的那一刻起，空间就是无限大的。这两种模型描述的“膨胀”，都是无限大的三维空间的膨胀。

这一点与脉动宇宙完全不同，脉动宇宙诞生时三维体积可能无限小，然后逐渐胀大，达到极大值后转化为收缩，体积越来越小，最后可能趋于无穷小，也可能在达到无穷小之前宇宙就会发生“反弹”，体积重新增大。究竟是达到“无穷小”还是发生“反弹”，目前学术界存在争议。

应该补充说明的是，脉动或膨胀的宇宙，在最初诞生时体积是否为无限小，科学家们也没有一致意见。

9. 永远膨胀还是脉动胀缩

不管宇宙将来会如何，会永远膨胀还是脉动收缩，我们今天的宇宙无疑都处在膨胀过程中。天文观测和哈勃定律都支持当前宇宙正在膨胀的观点，在学术界没有争议。

然而，人们还是想知道，我们的宇宙未来会按哪种模式运行，是永远膨胀还是会转化为收缩。前面已谈到，这一问题和我们所处的三维空间究竟有限还是无限是联系在一起的。有限无边的宇宙是脉动的，无限无边的宇宙是永远膨胀的。

科学家们发现，宇宙究竟属于哪一种，取决于宇宙中的物质密度。物质密度越大，万有引力的吸引效应就越强，这种吸引效应会使宇宙膨胀不断减速，密度越过一个临界密度ρ_c，吸引效应就会最终使宇宙的膨胀转化为收缩。

研究表明，如果当前宇宙中物质的密度ρ大于临界密度，即$\rho>\rho_c$，那么可以断定我们的三维空间曲率为正($K>0$)，空间是有限无边的，宇宙未来会从膨胀转化为收缩，也就是说我们的宇宙是脉动的宇宙。如果$\rho=\rho_c$，则可以断定我们所处的三维空间曲率为零($K=0$)，空间是平直的，无限无边的，我们的宇宙将永远膨胀下去。如果$\rho<\rho_c$，三维空间曲率为负($K<0$)，空间也是无限无边的，宇宙同样将永远膨胀下去。

计算得到的临界密度ρ_c，大约等于每立方米3个氢原子。观测表明，我们宇宙的物质密度只有每立方米0.3个氢原子，远小于临界密度。这方面的

观测资料支持我们的宇宙会永远膨胀的设想。不过，这种膨胀是减速膨胀，也就是说，我们宇宙的膨胀速度会越来越慢。

10. 惊人的发现：宇宙膨胀在加速

近年来的天文观测得出一个惊人的发现：宇宙的膨胀正在加速！天文学家们发现，大约在 60 亿年前，宇宙的膨胀从减速膨胀变成了加速膨胀。这是怎么回事呢，简直令人难以置信。

这一发现来自对I_a型超新星的观测。超新星爆发是大质量恒星演化到晚期出现的一场猛烈爆炸，它在一天里发出的光相当于太阳在一亿年里发出的光，所以超新星很亮，遥远星系中的超新星爆发我们都能看到。研究表明，质量大于七八个太阳质量的恒星，演化到晚期，如果还能剩余较多的质量，就有可能变成超新星。

超新星爆发可能形成中子星，也可能形成黑洞，形成的中子星和黑洞不一定一样大。此外，超新星还可能全部炸飞，不留残余星体。所以，超行星爆发的规模和真实亮度都差异很大，观测者很难断定。但是天文学家注意到一种恒星，演化到晚期时，质量小于 1.4 个太阳质量(钱德拉塞卡极限)。这种恒星原本不会超新星爆发，只会形成稳定的白矮星。但是，有的白矮星所处的太阳系不止一颗恒星，其他恒星的气体可能被白矮星吸过来，使白矮星质量不断增加，当它的质量超过 1.4 个太阳质量的时候，就会不稳定，形成超新星爆发。这种爆发不会形成中子星或黑洞，那需要至少 2—3 个太阳质量才行。质量刚刚超过 1.4 个太阳质量的白矮星，超新星爆发的唯一结果是全部炸飞，不留残骸。这种超新星称为I_a型超新星。

所有的I_a型超新星，质量都刚刚超过 1.4 个太阳质量，大小差不多，爆炸后都不留残骸，所以爆炸规模都差不多，绝对亮度(真实亮度)都差不多。天文学家建议用I_a型超新星的绝对亮度和视亮度(我们观测到的亮度)作比较，从而判定这颗超新星所在的星系离我们的远近。他们用这一方法重新

确定了这些星系到地球的距离。把新得到的距离和红移作比较,得出了我们的宇宙正在作加速膨胀的结论。这一结论目前已经被绝大多数学者所接受。

宇宙怎么会加速膨胀呢?膨胀的动力来自什么呢?于是科学家提出了暗能量假设。

11. 奇怪的暗物质

在介绍暗能量之前,我们先介绍一下暗物质。

天文学家早就发现,用牛顿第二定律和万有引力定律解释银河系的旋转运动有困难。

人们看到,整个银盘围绕银心转动,盘上恒星受到的向心力应该与它围绕银心转动时产生的惯性离心力平衡,二者相等才能维持稳定的旋转。向心力应该是银心物质施予的万有引力,但从天文观测得出的银心质量不足以产生如此大的万有引力。而且,从银盘上离银心远近不同的恒星的转速分别算出的离心力,也不支持银河系的主要质量完全集中于银心的假设。

总之,观测到的银河系中心的质量,包括发光的恒星,它们的行星、卫星,以及不发光的星际气体和尘埃的所有质量,都不足以产生足够的万有引力,以维持银盘上恒星的转动。而且,把全部质量集中于银心一点的设想也与观测矛盾。

此外,应该强调,用广义相对论取代万有引力定律,也不能得出适当的解释。实际上,在银河系的层级上,广义相对论与万有引力定律的差异可以忽略不计。

于是天文学家们猜测可能存在一种暗物质。这种物质很奇怪,它不参加电磁相互作用,因而既不发光,也不挡光,但产生万有引力。暗物质与我们观察到的可见物质不同,并不集中于银心,而是呈晕状分布。假设银河系中存在大量暗物质,就可以解释银盘上恒星的转动规律了。

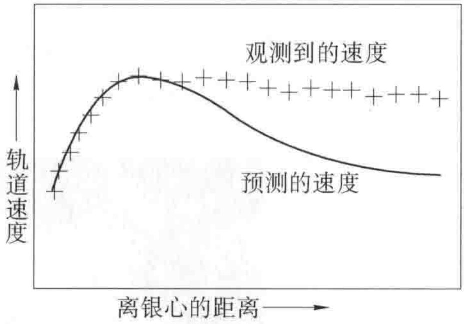


图 11-8　银河系自转速度曲线

应该强调的是，暗物质不是气体、尘埃，气体在光的照射下自身会发光，大量的气体和尘埃还会挡光，我们能通过观测发现它们。暗物质也不是黑洞，黑洞的存在会对光的传播产生影响。暗物质就像玻璃一样，对光完全透明。为了把气体、尘埃、黑洞等不发光的物质与暗物质明确分开，有时又把暗物质称为"冷暗物质"，不过通常仍简称为"暗物质"。

此外，在对遥远的类星体的研究中，发现存在"引力透镜"引起的光线弯曲，因而造成一个类星体产生多个图像的现象(图 11-9)，以及出现环状图

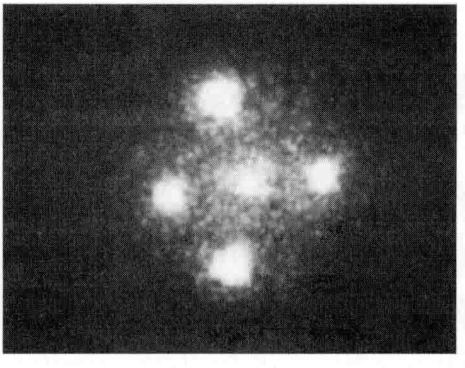
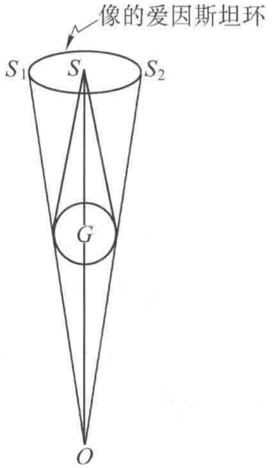


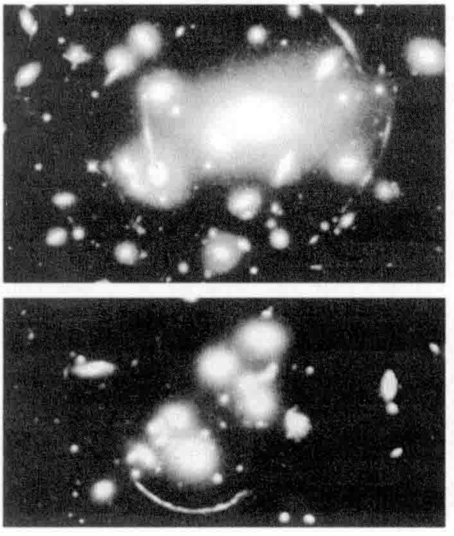
图 11-9　引力透镜造成的一个类星体出现多个图像的现象

像的现象，即所谓爱因斯坦环(图 11-10，其中(a)图为引力透镜的成像原理。O 观测者，S 为类星体，G 为透镜所在位置，S_1 与 S_2 为透镜所成的像。(b)图为天文观测看到的爱因斯坦环)。科学家们认为，"引力透镜"是由存

在于地球和类星体之间的大质量天体的万有引力造成的。但观测到的地球与类星体之间的天体的质量，又常常不足以产生足够的万有引力来形成“引力透镜”。天文学家们推测，那里也可能存在暗物质。



(a)



(b)

图 11-10　引力透镜造成的爱因斯坦环

12. 不可思议的暗能量

近年来，为了解释宇宙的加速膨胀，科学家们又设想宇宙间存在另一种奇怪的物质——暗能量。暗能量与暗物质有一点类似，就是它也不参加电磁相互作用，因而也不发光、不挡光，也是透明的。但它与普通物质和暗物质都不同，压强是负的，表现出“负的引力效应”——排斥效应，因而能促使宇宙膨胀加速。

科学家们认为宇宙中均匀地存在着暗能量，密度不但各处相同，而且不随时间变化。也就是说，随着宇宙膨胀，宇宙空间体积的胀大，会不断有暗能量从虚无中产生出来，使其密度保持不变。这一点和普通物质与暗物质

也不同。

普通物质与暗物质是成团分布的，它们的空间密度在小尺度（宇观尺度以下）上并不均匀。而且，除去宇宙极早期的一段时间之外，在宇宙膨胀过程中不再有普通物质和暗物质从真空中产生，所以它们的密度，在宇宙膨胀过程中会随着宇宙体积的增大而减小。

天体物理学家认为，在宇宙极早期的一小段时间中，曾有物质（包括暗物质）从真空中产生，主要是在宇宙诞生的瞬间，以及此后发生的一小段“暴胀”时期。在暴胀时期，宇宙膨胀速度极快，并逐渐演变到过冷态。这时，真空发生相变，大量真空能转化为普通物质，从真空中涌出。但这一段时间极短，在宇宙创生后 10^{-34}—10^{-32} 秒之间（注意，远远小于 1 秒）。此后“暴胀”结束，宇宙的膨胀速度又恢复到与今天的宇宙膨胀速度差不多，不再有物质从真空中产生。

科学家们认为，宇宙中的暗物质和暗能量远多于普通物质，在今天的宇宙中，它们所占的比例大致如下所示：

- 物质
  - 亮星　0.5%
  - 暗物质
    - 重子　4%
    - 热暗物质（中微子）　0.3%
    - 冷暗物质（未知）　29%
  - 暗能量　65%
    - 起源于宇宙学常数 λ
    - 动力学暗能量（未知）
    - 广义相对论在宇观尺度失效

上表中右面一列是各种物质占总物质的百分比。

表中的冷暗物质就是我们目前科学界谈论的暗物质，它究竟是什么东西，目前不清楚，人们设想了许多模型来对它进行猜测。

暗能量究竟是什么，也不清楚。许多粒子物理学家想出了各种奇奇怪怪的暗能量成分，但都不能得到天文观测的支持。另一种可能是，在宇观范围内广义相对论需要做大的修改，相对论专家也设想了多种方案，但同样未得到观测支持。

最有可能的是，所谓暗能量并不存在，宇宙膨胀加速是宇宙项的排斥效应造成的。这就是说，广义相对论的基本方程——场方程中还是应该含宇宙项，正确的场方程是(10.1)式而不是(9.1)式。爱因斯坦认为他一生所犯的最大错误(引进宇宙项)其实很可能并不是错误。

目前，关于暗物质与暗能量的讨论仍在继续。

第十二章　神秘的黑洞

1. 牛顿理论预言的暗星

在1800年前后，也就是拿破仑那个时代，英国剑桥大学的学监米歇尔与法国数学物理学家拉普拉斯，用牛顿理论分别独立地预言了一种暗星。他们认为，天空中存在一类明亮的天体，像恒星那样大，或许还像恒星那样多。这种天体由于自身的万有引力极强，把自己发出的光都拉了回去，所以这类天体虽然很亮，我们却看不到它们。

那个时候，光的微粒说占上风。他们认为，恒星发射光，就像大炮射出炮弹一样，如果恒星的万有引力极强，就有可能把射出的光子拉回去。

今天我们很容易从牛顿理论把这一问题搞清楚。设想光子的质量为 m，速度为 v，动能为 $\frac{1}{2}mv^2$；恒星质量为 M，光子位于恒星表面时的引力势能为 $G\frac{Mm}{r}$，式中 G 为万有引力常数，r 为恒星半径。一般情况下，光子的动能都会大于势能，都可以从恒星表面逃离。但是，当恒星质量足够大，半径又足够小，使得恒星表面处的光子势能大于动能时，即

$$G\frac{Mm}{r}>\frac{1}{2}mv^2$$

时，光子就不能从恒星表面逃离了。从上式不难得出形成暗星的条件是

$$r\leqslant\frac{2GM}{c^2} \tag{12.1}$$

为了与下面的相对论结果相比较，这里我们把光子速度 v 直接用真空中的光速 c 来代替。实际上，在拉普拉斯那个时代，人们还不知道真空中的光速 c 是个常数，更不知道光速 c 是极限速度。

(12.1)式，就是米歇尔与拉普拉斯预言的暗星形成的条件。

拉普拉斯在他的巨著《天体力学》的第一版(1796 年)和第二版(1799 年)中都谈到了这种暗星。但在 1808 年出版的第三版中，他取消了有关叙述。这是因为在第二版和第三版的出版时间之间，托马斯·杨于 1801 完成了光的双缝干涉实验，这一实验否定了牛顿提出的光的微粒说，证明了光实际上不是粒子，而是一种波。拉普拉斯认为自己在微粒说基础上预言的暗星，恐怕不可能存在了，所以他在自己的著作中删掉了有关论述。

2. 相对论对暗星的再次预言

此后学术界逐渐淡忘了拉普拉斯等人对暗星的预言。这种情况一直持续到 1939 年。那一年，美国物理学家奥本海默和施耐德，在用爱因斯坦的广义相对论研究中子星时，发现中子星有一个质量上限，超过这个质量上限的中子星将发生无限塌缩，最终形成外界看不见的暗星。这就是说他们用广义相对论再次预言了暗星的存在。有趣的是，他们得出的暗星产生条件和拉普拉斯等人给出的一样。

从今天的物理学来看，拉普拉斯等人在用牛顿理论预言暗星时，有若干错误。牛顿理论认为光子的动能为$\frac{1}{2}mc^2$，而相对论告诉我们，光子能量(动能)为mc^2。而且，从广义相对论的角度来看，拉普拉斯等人用的万有引力，

其实不是真正的力,而是时空弯曲的表现,是一种几何效应。在描述黑洞这样的天体时,万有引力定律和广义相对论有很大差异。也就是说,万有引力定律不能用来刻画黑洞,描述黑洞必须使用广义相对论。幸运的是,使用牛顿理论的两个错误的影响是相互抵消的,所以拉普拉斯等人得到了正确的暗星形成条件(12.1)式。这一条件与奥本海默等人用相对论算出的条件完全一致。

不过,奥本海默并没有继续这一研究。这是因为,不久之后"二战"就爆发了,奥本海默受命去研制原子弹。他担任了原子弹的总设计师,离开了天体物理的研究。"二战"之后,奥本海默又受到诬陷,长期遭受政治迫害,心情一直平静不下来。他再也没有回到暗星的研究上来。

其他人也没有继续奥本海默开创的暗星研究。这是因为包括爱因斯坦在内的一些著名学者都认为"暗星"不可能存在。他们觉得,暗星密度太大,太阳质量的暗星密度将达到每立方厘米100亿吨,这实在令人不可思议。当时,密度可达每立方厘米1亿吨到10亿吨的中子星尚未发现,已知的最密物质是白矮星上的物质,那也不过每立方厘米1吨左右。由于爱因斯坦等人的崇高威望,一般物理学家都认为自然界不可能存在暗星,因而没有人对暗星的研究产生兴趣。

直到1964年前后,才有美国物理学家惠勒对暗星问题产生了兴趣。惠勒曾参加过美国的氢弹研制,和氢弹总设计师泰勒关系不错。他在泰勒等人的帮助下,用位于核基地的当时最好的计算机模拟了中子星的坍缩。模拟结果表明,坍缩成"暗星"是完全可能的。于是包括惠勒在内的一些物理学家重新开始了对暗星的研究。1967年,惠勒把这类暗星命名为"黑洞",于是黑洞一词开始在物理学界、天文学界流传,并逐渐在人民大众中传播开来。

3. 飞近黑洞的飞船

广义相对论预言,时空弯曲的地方时间会走得慢。爱因斯坦发表广义

相对论的时候就指出，由于太阳表面的时空弯曲程度比地球附近大，所以放置在太阳表面的钟会比地球上的钟走得慢，因此太阳那里氢原子发出的光，在地球上的人看来会发生红移。天文观测证实了爱因斯坦的预言。我们在本书第 9 章第 5 节中对此作过详细的描述。不过，太阳表面的时空弯曲虽然比地球附近大一些，但总的弯曲程度并不厉害，所以我们观测到的引力红移十分微弱，测量起来都十分困难。

广义相对论的研究表明，黑洞附近的时空弯曲程度非常厉害，放置在黑洞附近的钟，在地球上的人看来，简直慢到了几乎不走的程度。放置在那里的光源发出的光，红移几乎趋于无穷大，也就是说光谱线的波长几乎趋于无穷大。

如果有一艘飞船飞向黑洞，地球上的人将看到，飞船越接近黑洞，就飞得越慢，飞船上的人的动作也越来越缓慢，逐渐趋于僵化。而且，由于时间变慢的作用，飞船的颜色也越来越红。最后飞船粘在了黑洞的表面上，但看不见它进入黑洞。这些现象都是由于越靠近黑洞的地方，时空弯曲得越厉害，在地球人看来，那里的时间进程越来越慢所造成的。

那么飞船能否进入黑洞呢？实际上，觉得飞船进不了黑洞，是远方观测者(例如地球上的人)看到的景象。但是，远方观测者看到的时间进程，并不是飞船上的人真实经历的时间。飞船上的宇航员没有觉得自己的时间变慢，他觉得自己在正常地生活、操作，飞船正常地趋近黑洞，并且正常地进入了黑洞。那么外面的人怎么看到他没有进入黑洞呢？那是因为他的图像留在了洞外。我们在教室里看一个同学走出门去，他的背影一闪就从门处消失了。这是因为组成他“背影”的光子，一下子都飞向了各方，包括飞到我们的眼中，在门口处没有遗留下“背影”的光子。黑洞处的情况与此大不相同，那里时空弯曲得极其厉害，飞船进入黑洞时，组成它“背影”的光子被滞留在黑洞表面附近，只能一点一点地往外跑，越跑越稀，要经过无穷长的时间才能逐渐跑完。所以，远方的观测者将看到飞船的“背影”滞留在那里，飞船似乎没有飞进去。但由于“背影”的光子越来越稀，远方的人将看到“背影”逐

渐变暗，逐渐消失在黑洞附近的黑暗中。

综上所述，地球上的观测者将看到飞向黑洞的飞船越来越慢，越来越红，越来越暗，但看不见飞船飞进黑洞，只看见飞船似乎“冻结”在了黑洞表面，逐渐消失在那里的黑暗之中。

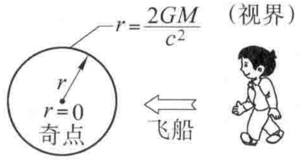


图 12－1　飞向黑洞的飞船

4. 时间与空间互换

前面说到，宇航员觉得自己的飞船正常地进入了黑洞，那么，他的遭遇又如何呢？

研究表明，黑洞内部有一个奇特的性质，那就是“时空坐标互换”。在黑洞内部，原来用于表示半径的径向坐标 r 变成了时间，原来的时间 t 却变成了空间坐标。时间与空间不同，它有流逝性，有方向性。那么时间 r 的方向指向哪里呢？物理学家们认为，黑洞是由致密的星体（例如中子星）塌缩形成的，形成黑洞的一瞬间，物质的运动方向是朝向星体中心（$r=0$ 处）的，所以，作为黑洞内部的时间参量 r，它的指向应该朝向 $r=0$ 的“球心”。然而，由于 r 已不再是空间坐标，不再是半径，所以 $r=0$ 也就不能再称为“球心”。那里，实际上是时间的“终点”，是时间终结的地方。

由于时间的流逝是不可抗拒的，进入黑洞的飞船将不能停留，会不可避免地奔向时间的“终点”$r=0$ 处。其实，任何进入黑洞的物质都必须奔向 $r=0$ 处。所以，黑洞内部，除去 $r=0$ 那一“点”之外，全部都是真空。物质全部聚集于 $r=0$ 处，那里物质的密度为无穷大。

研究表明，在 $r=0$ 处，时空的曲率也是无穷大，因此这一“点”被称为时空的奇点。图 12－2 给出了球对称黑洞的结构图。这里画出的球对称黑洞（又称史瓦西黑洞），是一种最简单的黑洞。黑洞的表面 $r=\frac{2GM}{c^2}$，被称为事件视界，或

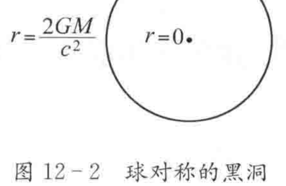


图 12－2　球对称的黑洞

者简称视界。

在黑洞内部，由于 r 表示时间，所以等 r 面不再是球面，而是“等时面”，等 r 面上的各点，处在相同的时刻。由于时间的流逝是不可抗拒的，只能从“过去”流向“未来”，因此等 r 面成了单向膜。所以，如上所说，进入黑洞内部的物质，只能向 $r=0$ 的方向跑，不能停留，更不能向 r 增大的方向跑。

这一方面导致黑洞内部整个是真空(除去奇点 $r=0$ 处之外)，另一方面导致洞内物质不可能往外跑，更不可能跑出洞外。所以黑洞是一颗只进不出的星，任何物质都可以掉进去，但任何东西都不能跑出来。

5. 有没有白洞

如果洞内时间流逝的方向不是朝向 $r=0$，而是反过来指向 r 增加的方向，那么这个洞就不是黑洞，而是白洞。白洞的情况与黑洞相反，它不断地向外喷出物质，而洞外的任何物质和信息都不能进入白洞。

奇点 $r=0$ 对于黑洞来说，是时间的“终点”，对于白洞来说则是时间的“起点”。

实际上，白洞是黑洞的时间反演。广义相对论承认白洞存在的可能性。一般人之所以大谈黑洞而不涉及白洞，是因为“洞”是星体坍缩形成的，开始形成“洞”的一瞬间，物质是向洞内跑而不是向外跑，这一初始条件决定了“洞”的时间方向指向洞内，所以“洞”应该是黑洞。人们还想象不出，有什么机制能够形成白洞。所以，科学家很少谈论白洞，但他们并不否认可能存在白洞。

6. 走向时间的终点

研究表明，进入黑洞的飞船，会很快到达“奇点”。广义相对论认为，奇点处于时间之外，所以进入黑洞的飞船和任何其他物质，都将很快处于时间

之外。“时间之外”是什么意思，现在还不清楚。

太阳质量的黑洞，半径大约3公里，进入这种黑洞的飞船，用不了1秒钟就会到达奇点，处于“时间之外”。当然，巨大的黑洞，例如星系级质量的黑洞（大约含几百亿、上千亿个太阳质量），进去的飞船和物质需要较长的时间才能抵达奇点，但这仍是一个有限的时间。

那么，进入黑洞的飞船上的宇航员能看到什么呢？能有什么感受呢？研究表明，飞船上的人看不到前方的“奇点”，也得不到来自前方的任何信息，因为“前方”的信息只有逆着时间前进，才能抵达宇航员的眼中，而逆着时间前进是不可能的。宇航员只能感到周围的万有引力越来越强，潮汐力越来越大。在第七章第3节中我们谈到过，所谓潮汐力，就是作用在物体不同部分的万有引力之差。靠近奇点时，集中于奇点附近的巨大质量，施加于宇航员和飞船的潮汐力会非常大，所以，宇航员和他的飞船都将在很短的时间内，被巨大的潮汐力撕碎，压入“奇点”，在那里处于时间之外。

总而言之，在远方的观测者看来，飞向黑洞的飞船进不了黑洞。飞船将越飞越慢，越来越红，越来越暗，最后“冻结”在黑洞的表面上，消失在那里的黑暗中。而飞船上的人则感觉自己顺利地进入了黑洞，他们接收不到来自前方的信息，只是感觉受到的潮汐力越来越大，越来越难以忍受，最终自己和飞船一起被潮汐力撕碎，压入“奇点”，处于时间之外。

我们看到作为球对称黑洞表面的视界，有三个特点：

第一，它是无限红移面。由于那里时间无限变慢，放在那里的钟将不再走，那里发过来的光，要产生无限红移。

第二，它是“事件视界”。由于任何物质和信息都逃不出黑洞，黑洞外的观测者将得不到来自视界内的任何信息。因而视界是一个只进不出的地方。事件视界还有一个奇特性质，它的法矢量长度为零，所以事件视界被称为零曲面。感兴趣的读者可参阅拙著《看不见的星》或《弯曲时空中的黑洞》。

第三，它是单向膜区的起点。由于黑洞内部的等 r 面是“等时面”，因而

是单向膜,其单向性指向奇点 $r=0$,即指向时间前进的方向。单向膜从视界开始,整个黑洞内部都充满了一层一层的单向膜。所以黑洞内部是单向膜区,视界是单向膜区的起点。

7. 黑洞无毛

研究发现,前面谈到的静态球对称黑洞(又称史瓦西黑洞)是最简单的黑洞。一般的黑洞还可能带电和转动。转动的黑洞称为克尔黑洞;既转动又带电的黑洞称为克尔—纽曼黑洞。这两种黑洞的结构相似,都比史瓦西黑洞复杂(图12-3)。它们的奇点不再是一个点,而是一个环,可以称为奇环,也可以仍称为奇点。它们的无限红移面会和视界分开。而且无限红移面和视界都将分为内、外两个。即图中的外无限红移面、外视界和内视界,内无限红移面没有在图中画出。外视界与外无限红移面之间的区域称为能层,那里贮存着黑洞的转动动能。彭罗斯等人认为这些动能可以被洞外的人提取。如果有人从能层中提取黑洞的转动动能,黑洞的转动将慢慢停止下来,逐渐成为不转动的史瓦西黑洞。

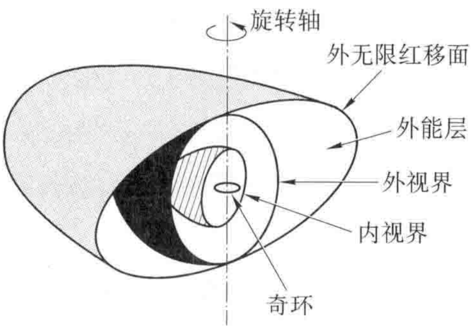


图12-3 转动带电的黑洞

转动带电黑洞的边界不是外无限红移面,而是外视界。进入红移面以内但没有进入外视界的飞船,也即进入了能层的飞船,仍可以逃离黑洞。但进入外视界的任何物体都不可能逃出外视界。这就是说,外视界才是黑洞

的边界，外视界以里的区域才是黑洞内部。能层不过是黑洞的附属物，仍处于黑洞外部。

外部观测者基本探测不到转动带电黑洞内部(即外视界以里)的信息。研究表明，外面的人只能探测到黑洞的三个信息，即它的总质量 M，总电荷 Q 和总角动量 J，其他信息都不可能知道。

所以，我们不可能知道黑洞形成之前是一颗什么样的星，它原来的物质成分和结构，也不可能知道黑洞形成的过程，它是星体一次坍缩而成呢？还是形成后不断有物质掉进去，个子逐渐长大的呢？黑洞是一种“忘了本”的星，它忘记了自己的“过去”，也忘记了自己的“历史”。

科学家把信息戏称为“毛”，提出一个“无毛定理”。这个定理说黑洞没有毛，也就是说黑洞内部的信息外面的人都探测不到。

实际上，黑洞还有三根毛，即总质量 M，总电荷 Q 和总角动量 J，外部观测者还能探测到这三点信息，看到这三根毛。我们中国有本书叫《三毛流浪记》。如果当初是中国人最先发现黑洞几乎无毛，大概就会戏称其为“三毛定理”了，实际上“三毛”比“无毛”要更确切。

8. 存在宇宙监督吗

研究表明，黑洞可以携带大量电荷，也可以快速转动。人们发现，如果黑洞带的电足够多，或者转得足够快，就会使它的视界和“单向膜区”一起消失，使奇点(或奇环，以下通称奇点)裸露出来。这一裸露可不得了。由于奇点会发出完全不确定的信息，裸奇点将破坏时空中的因果结构。因此，不应该让奇点裸露出来，或者说，应该有一条自然规律，会阻止奇点裸露。是什么规律呢？现在还没有一致意见。

于是数学物理学家彭罗斯就提出了一条假设——宇宙监督假设。这条假设说：

“存在一位宇宙监督，它禁止裸奇点的出现。”

“宇宙监督”是什么呢，不清楚。这句话几乎等于什么也没有说。有点像物理学史上，大气压强发现之前所说的“自然害怕真空”。

首先面对“裸奇点”的人如果是中国人，绝不会想出“宇宙监督”之类的提法，只有欧美人才会想出这个怪名称。这是因为西洋人的历史源于古埃及、古巴比伦、古希腊和古罗马。在古罗马时期，城市中有一种监督官，不许人不穿衣服在街上走。所以，彭罗斯才会想到宇宙也应该有一个监督官，禁止奇点裸露出来。奇点必须穿上衣服，这件衣服就是黑洞的视界。视界外的人看不见视界内的任何东西，包括奇点。也就是说，奇点必须待在黑洞里面，黑洞的视界不许消失。

后来，彭罗斯又把宇宙监督假设加以改进和发展，总之是说不允许奇点影响时空的因果性。不仅视界不能消失，奇点必须包在视界内，而且还不准掉进黑洞的观测者看见奇点，受到其不良影响。

第十三章　霍金与黑洞

1. 并非神童的霍金

现在我们要介绍一下当今世界最为走红的科学明星——霍金。

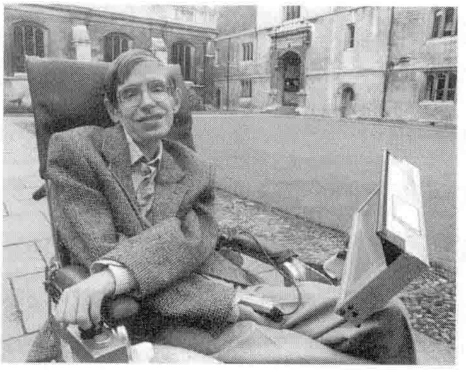


图 13-1　霍金在剑桥大学校园

霍金诞生于1942年的1月8日，也就是伽利略逝世300周年的那一天。他常常提醒人们注意这一点，意思是："你们看我像不像伽利略再世？"当然，这是开玩笑，他自己就说，其实这一天出生的孩子有20万。

霍金的父母都毕业于牛津大学。父亲学生物医学，家庭出身贫寒，因而十分注意节俭，但对别人很慷慨。

霍金的母亲学文秘，年青时是英国共青团的团员，成年后转入较为温和的左翼政党——工党。霍金经常随母亲参加各种游行和政治活动，受母亲影响较大。

年幼时由于家境不宽裕，霍金没有钱上优秀的贵族子弟学校，父母只好送他上了一所普通学校。

当时英国的学校在搞教学改革，他上的那所学校把同年级的学生分成A、B、C三个班。成绩最好的在A班，中等的在B班，成绩差的在C班。然后每年按分数调整一下学生的班级。霍金被分在A班。一年后，成绩在20名以下的要降到B班，B班的前20名将升到A班。B班与C班也要做同样的调整。霍金第1学期考了第24名，第2学期考了第23名。幸亏还有个第3学期，他终于考了第18名，免去了降到B班的遭遇。

霍金本人很反对这种教学方式，认为这种升降班模式对降下去的孩子心理打击太大，非常不利于少年儿童的健康发展。中国有句古话，叫“大器晚成”。就是说，能够“成大器”，即将来有大成就的人，刚开始时往往显示不出优秀，要到后来才会看出他的惊人才华。

霍金在班上功课不突出，字也写得不好，似乎有点“不可救药”。但是同学们却似乎从他身上看出了才华，给他起了个绰号叫“爱因斯坦”。没有想到这个绰号居然叫发了，青年霍金真的成了“当代的爱因斯坦”。

同学们从什么地方看出了他有才华呢？可能是觉得他读的课外书较多，知识面较宽。霍金常在同学面前发表议论：“宇宙的创生需要上帝帮忙吗？”“远方星系射来的光发红，是不是由于光跑的距离太长，光子跑累了？”正是这些有趣的“不解之谜”，把霍金引向了爱因斯坦的相对论，引向了对宇宙的研究。

霍金的父亲原本希望他学医。在西方，医生是个受人尊敬而且收入颇丰的职业。然而霍金对学医没有兴趣。他起先对物理学也没有兴趣，因为中学的物理课内容简单而枯燥。他觉得化学还比较有意思，化学课上不时会发生一些意外，例如爆炸啦，起火啦之类的事情。他觉得很有趣。

中学快毕业时，受到一位物理课老师的影响，他对物理学越来越感兴趣，终于下决心去攻读物理学。高考前夕，可能因为紧张，他失眠了，可是还是考上了牛津大学，他父母的母校。

2. 教改中的牛津大学

当时英国的大学正在搞教改。整个三年本科期间只考两次试。刚入学时考一次，看你的高考成绩是否真实。然后就不考试了，直到大学毕业前夕，再考一次，在 4 天之内把 3 年学的功课统统考一遍。这个压力其实也不算小。

他们平时的教学也在搞改革。例如电磁学，有一次上课，老师说："你们把第 10 章自学一下，后面有 13 道题，都做一下。现在下课，两周后咱们再见面，届时把作业交来。"这课就算上完了。下课后，同宿舍的几位同学都在那里看书、做题，霍金则控制不住自己，一直在玩。

书上的题还真难。到了交作业的前一天，同学们都只做出了一两道题。霍金此时想起来第二天要交作业了，这才谢绝了拉他去玩的邀请，赶紧做作业。有的同学心想：这时候才想起做作业呀！准备看他的笑话。

中午，霍金下楼去吃午饭，迎面碰上下课回来的同学。他们问霍金："题都做完了吗？"霍金迷惑地答道："这题还真难，我没来得及做完，只完成了 10 题。"大家都惊呆了。

霍金后来回忆，由于学校放得很松，自己花在学习上的时间很少，大概平均每天只有一小时。

3. 疾病造就了伟人

霍金一生的转折发生在他上大三的时候。有一天，他系鞋带时，突然发现手不灵活了，而且此后越来越不行，于是去医院检查。英国的医学确实很

发达,很快就确诊了。霍金得的病叫“进行性肌肉萎缩”,也就是我们常说的“渐冻人”。这是一种不治之症。患者的四肢将逐渐失去活动能力,变得全身瘫痪。医生也十分惋惜:“年轻人,怎么会得这种病?哎,没办法治啊!吃点好的吧!”

霍金也十分沮丧:自己还没有开始真正的生活,生命就暗淡无光了。来日不多了,而且会越来越糟。生活将变得毫无意义,自己将成为家庭和社会的负担!他失望极了,买了一箱啤酒,整天在宿舍里喝酒。他觉得生活完全失去了意义,自己将成为一个完全无用的废人。

这时,有一个人鼓舞了他。这个人就是他的女友简·瓦尔德。简是牛津大学哲学系的学生。在疾病面前她没有退缩,而是坚定地向霍金表示,自己继续爱他。“你得了这种病也没有关系,我决心和你结婚,你放心吧,不要悲观,要勇敢面对疾病和自己的未来。”

简的态度给予霍金巨大的支持。霍金备感鼓舞,决心勇敢面对疾病,坚强地活下去。他想,既然暂时死不了,将来要结婚,要组建家庭,自己就要有能力养家。他觉得必须开始努力,不仅要上完大学,还要争取读博士。



图13-2 婚礼上的霍金

于是,霍金好像变了一个人,变得无比的刻苦勤奋。一段时间之后,他发现自己很喜欢学习和研究,也很适合干科研工作。霍金是一个十分幽默的人,他说他不禁想起了一句格言:“科学家和妓女一样,都为自己喜爱的工

作而获得报酬。”

有一天,他下楼时突然从楼梯上滚了下去,一直滚到最下面,完全失去了知觉。同学们赶快把他抱回宿舍,放在他的床上。过了好一阵,霍金才睁开眼睛,他什么都想不起来了,问的第一个问题是:“我是谁?”同学们赶忙回答,“你是霍金,你连自己的名字都忘了吗?”两分钟后,他记起了自己是霍金。然后又问“这是什么地方?”大家告诉他,“这儿是你上的牛津大学。”他逐渐想起来自己刚上大学的时候,但不记得一年前的事情。过了一段时间,他渐渐想起了一年前的事情,但不记得更近的事情。他慢慢回忆,两小时后才想起刚才从楼梯上跌下去的事情。

毕业考试之后,同宿舍的 4 个人有 3 个觉得考得不好,只有一个人比较满意。成绩一公布,除去那位觉得考得不错的同学比较失望之外,霍金和另外两个比较沮丧的同学的成绩都比预想的要高。

霍金取得了优秀的笔试成绩。口试时,老师问拄着拐杖的霍金:“你想去剑桥读博士呢,还是想留在牛津?”他回答说,“你们给我的成绩如果是一等,我就去剑桥,如果给我二等,我就留在牛津。”主考老师给了他一等,于是他就去了剑桥。

4. 走进剑桥大学

上大学本科时,霍金对物理学的两个领域产生了兴趣。一个是研究微观世界的粒子物理,一个是研究宏观世界的天体物理。

那时的基本粒子研究,主要是研究各种粒子的对称性和分类,有点像植物学,还没有一个很好的物理理论可以应用。那时规范场论已有初步进展,但还不能大规模应用,弱电统一理论和色动力学都还没有诞生。霍金没有注意到规范场论的初步成果。他不喜欢植物分类式的研究。这时他注意到,在对天体物理,特别是对宇宙学的研究中,已有一个成熟的理论工具,那就是爱因斯坦的广义相对论。况且,他从小就对宇宙的创生和河外星系的

红移感兴趣。于是他决定选择这个研究领域。

他之所以选择剑桥大学，是因为那里有一位著名的相对论天体物理专家——霍伊尔教授。霍伊尔曾对恒星内部的热核反应研究作出过重大贡献。特别是解决了氦聚合成碳的热核反应如何进行的难题。这一突破使恒星演化过程中的热核反应链条得以连接起来，从而解决了各种重元素的生成机制，对白矮星、中子星、超新星的研究都极为重要(感兴趣的读者可参看拙著《看不见的星》)。

后来霍伊尔又进入了宇宙学研究，提出了一个与“大爆炸模型”对应的“稳恒态宇宙模型”，认为宇宙并不存在一个初始的高温阶段。宇宙膨胀过程中一直有物质从真空中产生出来，使宇宙中的物质密度保持不变。

霍金对霍伊尔的“稳恒态宇宙模型”很感兴趣，一心想投奔霍伊尔教授，追随他学习相对论天体物理学，研究宇宙学。但没想到霍伊尔不要他。霍金感到极度失望，怎么办呢？有人告诉他，剑桥还有一位研究相对论天体物理学的教师斯亚玛。斯亚玛是谁？霍金从来没有听说过。一打听，此人还有一个不主动管研究生的名声。斯亚玛一般不会拒绝登门的学生，但收研究生后他也一般不会给他们课题，而是让研究生自己去找课题。研究生不找他，他也不主动过问。如果研究生找他，他会向这位研究生介绍有关的书籍和专家，让研究生自己去读书，自己去找专家。

笔者最初听说斯亚玛这种带研究生的方式之后，很不以为然，觉得老师怎么能不管学生呢？这位老师简直不合格呀。后来才知道，霍金那一代全世界最著名的八九个相对论专家，竟然有4个出自斯亚玛的门下。

斯亚玛带研究生，特别是带博士研究生的方式，其实是最好、最正确的。博士是最高级的学术人才，如果一个人不能自己找课题，不能自己攻克难关，做论文离不开老师帮忙，他能算一个合格的博士吗？博士生应该锻炼独立提出课题、独立解决难题的能力，这样将来才可能成长为一位学术带头人。

由于别无选择，霍金当了斯亚玛的研究生，那是1962年的事。

5. 闯进科研的战场

一开始，霍金没有找到研究课题，心中仍对霍伊尔的科研内容感兴趣。于是他走进霍伊尔的研究生纳里卡的办公室，看见他正在计算什么东西。便问他“你在干什么呢？”“正在算霍伊尔教授布置的课题，改进他的‘稳恒态模型’。”“我帮你算好吗？”“那当然好啦。”于是霍金坐在了桌旁，开始帮纳里卡算。纳里卡是一位老实、勤奋的印度留学生。

经过几天的钻研，霍金突然发现霍伊尔模型中的一个系数是无穷大。他可以证明这个系数肯定是无穷大！这可是个致命的问题。大家知道，公式中的系数必须是有限值，不能是零，也不能是无穷大。系数如果是零，则乘任何数都将是零；如果是无穷大，则乘任何数都将是无穷大。理论将变得毫无意义。

纳里卡没有把霍金的见解转告霍伊尔。不久后，霍伊尔在一次学术报告会上介绍自己的理论，听众有上百人，霍金也在其中。霍伊尔报告完后，得意地环顾一下会场，问“诸位有没有什么问题？”这时坐在后排的霍金拄着拐杖站了起来，说：“我有一个问题。”“什么问题？”“你公式中的那个系数是无穷大。”“不是无穷大。”“是无穷大。”“不是。”但霍金坚定地回答“是”。于是全场哄笑了起来。霍伊尔十分恼怒，问“你怎么知道？”霍金说“我算过”。又是一阵哄笑。霍伊尔觉得太丢面子了。会后，他对别人讲，“霍金这个人没有道德，既然发现了我论文中的问题，为什么不事前对我讲？”霍金的朋友们则认为，真正不道德的是霍伊尔本人，“为什么不好好检查一下自己的理论，就拿出来讲？这不是误人子弟吗？”霍伊尔简直气坏了，他把一腔怒火都撒在了自己的学生纳里卡身上。

霍金挑霍伊尔理论的毛病发生在 1962 年。1964 年，发生了霍伊尔更不愿看到的事情，那一年彭齐亚斯和威尔逊发现了宇宙中的微波背景辐射，即大爆炸的余热，极大地支持了“大爆炸模型”。这一发现等于宣判了“稳恒态

宇宙模型”的死刑。从此，“大爆炸模型”在宇宙学中占据了统治地位。

挑出霍伊尔模型的毛病，使霍金名声大噪，老师斯亚玛也对他刮目相看，认识到霍金确实是一个不可多得的人才，于是很快介绍霍金认识了自己的朋友，数学家彭罗斯。

6. 探索奇点之谜

彭罗斯原本一心钻研数学。斯亚玛了解到他的才华后，就拉他过来研究相对论。在看了一些相对论书籍后，他真的对相对论产生了极大兴趣，开始进入这一领域钻研。

当时正好一些苏联物理学家(卡拉特尼柯夫和栗弗席兹)正在研究广义相对论中的奇点问题。他们的工作引起了彭罗斯的极大兴趣。

栗弗席兹曾是朗道的助手和主要合作者，对物理学的教学和研究作出过重大贡献。他与朗道合作写了10卷《理论物理学》，这部巨著享誉全球。

20世纪60年代，他和卡拉特尼柯夫对广义相对论的奇点问题产生了兴趣。众所周知，黑洞内部存在奇点或奇环，大爆炸宇宙存在一个初始奇点，大坍缩宇宙存在一个终结奇点。奇点是时空曲率呈现无穷大的地方，而且这种“无穷大”不能通过坐标变换加以消除，也就是说，这种奇点似乎是时空固有的。

他们注意到，所有满足广义相对论的时空似乎都有奇点。难道广义相对论一定会导致奇点的出现吗？他们觉得应该不会。

那么，为什么现有的从爱因斯坦场方程解出的时空都有奇点呢？他们推测这可能是由于人们把时空的对称性想象得太好所致。前面谈到，广义相对论的场方程非常难解，为了得到解，人们就不得不赋予时空十分严格的对称性，例如严格的球对称、严格的旋转轴对称，等等。赋予的对称性越强，场方程就越好解。例如，描述球对称黑洞的史瓦西解，就是假设时空具有严格的球对称性，星体在坍缩成黑洞时，每一瞬间都严格保持球对称，在严格

的球对称下向球心塌缩，终于导致了球对称黑洞的形成，而且进入黑洞的物质继续严格“球对称”地向“$r=0$”聚集，最终在那里形成了时空曲率为无穷大的奇点。卡拉特尼柯夫和栗弗席兹认为，真实的星体塌缩不可能做到严格球对称。只要不是严格球对称，下落物质就会从球心擦肩而过，形不成奇点。他们对此做了学术论证。

彭罗斯不相信他们的结论。他认为奇点是广义相对论本身带来的，是时空固有的，星体塌缩即使不是严格球对称，也会形成奇点。奇点的形成与时空对称性基本无关。彭罗斯的结论是，只要广义相对论正确，时空具有良好的因果性，能量非负，而且时空不是严格的真空，至少有一点处存在正能物质，那么时空就一定会出现奇点。彭罗斯以黑洞为例，推翻了卡拉特尼柯夫和栗弗席兹的工作，证明了上述结论。此结论被称为“奇点定理”。

特别令人感兴趣的是，彭罗斯把奇点解释为时间的“起点”或“终点”。这就是说，他的奇点定理表明，一个正常的物理时空，只要广义相对论在其中成立，就至少存在一个时间过程，它的时间有开始，或者有结束，或者既有开始又有结束（感兴趣的读者可参看拙著《看不见的星》或《弯曲时空中的黑洞》）。

霍金在了解彭罗斯的奇点定理后，非常感兴趣。他就把自己的博士论文课题选在对奇点的研究上。彭罗斯的工作仅针对星体的塌缩，即针对形成黑洞或白洞的时空。黑洞中有一个星体塌缩形成的奇点，即时间的终点。白洞中则有一个向外喷射物质的奇点，即时间的开端。

霍金想，白洞的喷发有点像宇宙的初始大爆炸，黑洞的收缩有点像宇宙晚期的塌缩。于是，他努力把彭罗斯对奇点定理的证明，从黑洞、白洞情况，推广到大爆炸和大塌缩的宇宙模型中。经过反复的努力，他终于如愿以偿。1965 年左右，他证明了大爆炸宇宙一定有一个时间的开始（初始奇点），大塌缩宇宙一定有一个时间的终结（终极奇点）。

霍金的博士论文分成两个部分。第一部分是证明霍伊尔改进的“稳恒态宇宙模型”有误，第二部分则是对彭罗斯奇点定理的进一步推进、发展。

对奇点定理的贡献,应看作霍金在科研领域的第一个重要贡献。

7. 面积定理导致的思索

1970年末的一天晚上,霍金在缓慢地脱衣上床睡觉的过程中,突然想到自己创造的研究宇宙中奇点的数学方法,可以进一步运用于黑洞研究。按照这一思路,他发现一个奇怪的推论:黑洞的表面积随着时间发展,似乎只能增大不能减小。他被自己的想法震撼了,激动得一夜没有睡好。

第二天,他就把自己的想法告诉了彭罗斯,得到了彭罗斯的赞同。于是霍金全力以赴,终于证明了这一定理——面积定理。这是1971年到1972年的事情。

按照面积定理,两个小黑洞可以合并成一个大黑洞,但一个大黑洞不能分裂成两个小黑洞。这是因为一个大黑洞的面积大于总质量与它相等的两个小黑洞的面积之和。

然而这一推论并非面积定理的主要成果。

8. 贝肯斯坦的突破:黑洞有熵

霍金的有关论文发表后,引起了美国的一位研究生贝肯斯坦的注意。贝肯斯坦对这一结论十分惊奇。他想,物理学中还有没有类似的结论呢?他想起了热力学(即热学)中的一个重要概念——熵。熵,粗略地说就是微观粒子混乱度的量度。人们都知道有个能量守恒定律,这个定律又称为热力学第一定律。物理学中还有一个同样重要的热力学第二定律。这一定律最直观的表述是:热量只能自发地从高温物体流向低温物体,绝不可能自发地从低温物体流向高温物体,而不引起其他变化。这一定律的另一种表述是:孤立系统或绝热系统(即不能与外界产生热交换的系统)中的熵,只能增加不能减少。

“黑洞的表面积”竟然与“熵”类似，这太令人惊奇了，这可是两个相互八竿子捅不着的东西，它们怎么会类似呢？难道黑洞的表面积是一种熵吗？可是霍金在面积定理的证明中并未用到热学的东西，面积怎么会是熵呢？

贝肯斯坦对自己的猜想既惊喜又怀疑。如果自己的猜测是对的，这可是个重要的物理学思想。但是，这一猜测真的对吗？这时，他的导师惠勒教授支持了他。惠勒正是那位参加过美国氢弹研制，又证实了奥本海默预言的黑洞有可能形成的物理学家。他是20世纪60年代相对论领域的大师。

惠勒对贝肯斯坦说，假设你手拿一杯热水，这时有一个黑洞从你身边飘过，你把这杯水扔进黑洞，你就失去了这杯水的全部信息。然而，杯中的热水由大量水分子组成，分子的热运动造成熵，这杯水具有熵，把水扔进黑洞后，熵也从时空中消失了。由于得不到黑洞中熵的信息，自然界中的熵将会减少，这可是违背热力学第二定律的呀。贝肯斯坦立刻想通了，水进入黑洞，使黑洞质量增加，表面积自然也增加了。我们从外部能够感知黑洞面积的增加。如果黑洞表面积就是黑洞熵的话，热水的熵虽然从自然界中消失了，但黑洞熵却增加了，自然界中的总熵没有减少。所以，把黑洞表面积看作黑洞熵，不仅是正确的，而且是必需的，否则将会违背热力学第二定律。

1973年，经过反复思考的贝肯斯坦勇敢地指出，黑洞具有熵，黑洞的表面积就是熵。而且他还在黑洞理论中发现了一个与温度相似的量，叫作黑洞的表面引力。粗略地说，黑洞表面引力，就是位于黑洞表面的一个具有单位质量的质点所受到的万有引力。而且，贝肯斯坦把“黑洞表面积”和“表面引力”与黑洞的总质量、总电荷和总角动量放在一起写成了一个公式，此公式与热学中的第一定律表达式非常相似，公式中的“表面积”和“表面引力”分别出现在“熵”和“温度”的位置。

9. 霍金愤怒反击：黑洞没有熵

霍金坚决拒绝贝肯斯坦的观点，他认为贝肯斯坦完全曲解了自己的“面

积定理”，黑洞的表面积不可能是熵，所谓“表面引力”也不可能是温度。他强调，自己的面积定理完全是用几何和广义相对论得出的，在几何和广义相对论中都没有“热”存在，怎么可能得出热学概念和热学定律呢？再说，如果黑洞有温度，就一定会有热辐射，就会有粒子以热辐射的形式从黑洞喷出。广义相对论已经证明，黑洞是一个只进不出的星体，怎么可能有粒子从中射出呢？

“愤怒”的霍金认为，贝肯斯坦完全错了。于是，在一次贝肯斯坦没有参加的暑期讨论班上，霍金和另外两位相对论专家合写了一篇论文，指出贝肯斯坦得出的类似热学定律的公式虽然数学上正确，但他对此公式的解释则是完全错误的。此公式中的黑洞表面积虽然像熵，但不是真正的熵；“表面引力”虽然像温度，但不是真正的温度。这一公式虽然像热力学第一定律的表达式，但不是真正的热学公式，而是一个与热学公式类似的力学公式。霍金他们用更严格的微分几何方法重新推出了贝肯斯坦的公式，但在物理意义上对贝肯斯坦的解释做了全面否定。

贝肯斯坦重新解释面积定理，以及霍金等人对贝肯斯坦的反驳都发生在1973年。

10. 霍金改变主张：黑洞有温度和熵

完成反驳贝肯斯坦的论文之后，霍金回到剑桥大学。

他仍在思索自己与贝肯斯坦的争论。他忽然反过来想：“万一贝肯斯坦是对的呢？”如果贝肯斯坦是对的，黑洞真有温度和熵，那么黑洞就应该有热辐射，黑洞真有可能射出粒子来吗？如果真是这样，人们对黑洞的认识就要发生里程碑式的改变。

霍金反复思考，他终于明白了，以前人们考虑的都是经典黑洞，没有考虑量子效应，如果考虑黑洞附近的量子效应，也许就会得出黑洞有辐射的结论。

经过认真的研究，霍金在1974年确认黑洞真的有热辐射，黑洞表面引力确实是温度，表面积确实是熵。他用弯曲时空量子场论的方法严格证明了上述结论。

所谓弯曲时空量子场论，是一个半经典半量子的引力理论。提出这一理论的原因是，企图把引力场量子化的所有方案都失败了。于是人们只好暂时提出一个过渡性的理论，不把万有引力场（时空弯曲）量子化，只把其余各种物质场量子化，用这种半经典半量子的理论来研究强引力场（例如黑洞附近和宇宙极早期）中的量子效应。

引力场为何很难量子化，至今是个谜。有关讨论超出了本书的范围，感兴趣的读者可参阅有关书籍和文章。

11. 不可忽略的真空涨落

霍金的物理思想是这样的：黑洞附近的真空涨落导致了粒子流从黑洞喷出，并严格证明了喷出的粒子流形成热辐射，其温度与黑洞的表面引力成正比。

"真空涨落"是量子论专家熟悉的一个概念，在平直时空中就存在。量子论认为真空不空。真空并非一无所有，而是不断有虚粒子对从真空中产生，然后很快湮灭。这种虚粒子对中，一个是正粒子（例如电子），另一个是反粒子（例如正电子，正电子与电子只是电荷相反，其他物理特性完全一样）。真空中产生的这对虚粒子，一个带正能，一个带负能。在虚电子对情况，可能电子带正能，正电子带负能，也可能相反，电子带负能，正电子带正能。总能量是零，总电荷也为零。

量子论认为，真空中不断有虚粒子对产生，然后又很快湮灭，存在的时间极短。这就是所谓真空涨落。量子论还认为，虚粒子的能量 ΔE 与它存在的时间 Δt 之间，满足（13.1）式所示的测不准关系：

$$\Delta t \Delta E \sim \frac{\hbar}{2} \tag{13.1}$$

式中 $\hbar=\dfrac{h}{2\pi}$，h 是普朗克常数。测不准关系是德国物理学家海森伯首先提出的，它是量子理论最基本的假定之一，已被大量实验所证实。上式告诉我们，虚粒子的质量(即能量 $E=mc^2$)越大，它存在的时间就越短，所以每一个真空涨落，都只经历极短的时间过程。真空涨落直接观察不到，但它的间接效应，对其他量子过程的影响，早已被实验所证实。

12. 重大突破：霍金热辐射

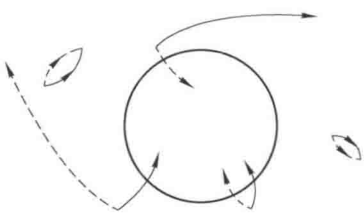


图 13-3　黑洞附近的真空涨落

霍金认为，黑洞附近也存在真空涨落(图 13-3)。当真空涨落发生在黑洞附近时，可能出现三种情况：第一种情况与平直时空中类似，产生的虚粒子对会瞬间湮灭，不产生特别的效应；第二种情况是，产生的正反粒子对都落入黑洞，这种情况也不产生额外的效应；第三种情况，虚粒子对中负能的一个落入黑洞，正能的一个留在洞外，并飞向远方。例如负能的一个是正电子，它落入黑洞，正能的电子飞向远方。负能的正电子落入黑洞后，由于黑洞内部是单向膜区，时间 r 的方向指向奇点 $r=0$，所以负能正电子将顺着时间的方向飞向奇点，与奇点附近聚积的物质相碰，使那里的物质(也就是黑洞内部的物质)减少了一个电子质量(注意此正电子质量为负，电荷为正)，同时也减少了一个电子电荷，即减少了一个负电荷。远方的观测者看到一个电子向他飞来。同时看到黑洞减少了一个电子的质量和电荷。所以，远方观测者认为，黑洞射出了一个带负电的正能电子。

需要说明的是，不可能出现与第三种情况相反的情况，即虚粒子对中正能的一个落入黑洞，负能的一个飞向远方的情况。这是因为黑洞外部的时空不允许负能粒子长期存在，只有黑洞内部的时空才允许负能粒子长时间

存在。所以,如果虚粒子对中正能的一个掉进了黑洞,负能的一个一定会跟着掉进去,这正是上面说的第二种情况。

霍金认为,上述"负能正电子(注意,带正电)落入黑洞,顺着时间方向落向奇点,同时正能电子飞向远方"的过程,可以等效地看作"一个正能电子(带负电),逆着时间从奇点飞向黑洞表面(视界),然后在视界处被散射,再顺着时间飞向远方"。

霍金用弯曲时空量子场论严格证明了存在上述过程,而且射出的粒子的能量分布满足普朗克黑体辐射谱,而黑体辐射谱正是热辐射的标志。这就是说,霍金证明了黑洞能产生热辐射,能通过热辐射的形式把物质从黑洞内部射出来。他证明了辐射温度恰为"表面引力"所示。

霍金的这一工作,确认了黑洞有温度和熵,黑洞熵就是黑洞的表面积。这一证明极为重要,它确认了黑洞具有热性质。为了纪念霍金的这一成就,黑洞热辐射被命名为霍金辐射。

他作出这一发现后,他的老师斯亚玛骄傲地指出,"毫无疑问,霍金已成为 20 世纪最优秀的物理学家之一"。又说,"我一生对相对论作了两个大贡献,一是培养了霍金这个学生,二是把彭罗斯拉过来研究相对论。"

第十四章　信息疑难、虫洞疑难与奇点疑难

1. 负比热与信息疑难

黑洞理论刚刚提出的时候，有些科学家就指出，黑洞存在信息疑难。这是因为，对于黑洞外的人们将永远失去那些形成黑洞，以及后来掉进黑洞的物质的几乎全部信息，只剩下那"三根毛"。这种情况会否影响信息守恒呢？多数人认为不会。虽然外部的人失去了黑洞内部物质的信息，但是这些信息并没有从自然界中消失，它们只不过被锁在了黑洞内部。我们虽然得不到这些信息，但它们依然存在，所以不会影响信息守恒。

霍金辐射发现之后，这个问题变得严重起来。这是因为黑洞内的物质会化为热辐射跑出来，而热辐射是最简单的辐射，几乎不携带任何信息。

人们还注意到，黑洞的比热为负。这就是说黑洞与我们通常碰到的物体都不同，一般物质的比热都是正的，吸热时温度升高，放热时温度降低。

可是黑洞不同，研究表明，黑洞的温度和它的质量成反比：

$$T \sim \frac{1}{M} \tag{14.1}$$

黑洞吸热时，质量 M 增加，温度反而降低。放热时质量减少，温度反而升高。因此，黑洞具有负的比热。

具有负比热的物体，虽然也能与外界达到热平衡，但这种平衡是不稳定的。例如，如果黑洞周围存在热辐射，辐射温度与黑洞温度相等，那么它们处于热平衡状态。热学研究告诉我们，任何情况下都会存在热涨落，热涨落会使原来的平衡态略微偏离平衡。

黑洞与周围的热辐射也会出现热涨落。如果涨落的结果是黑洞温度比周围热辐射的温度降低了一点，则外界的热量将流向黑洞，黑洞吸收外部的热辐射后，质量增加，温度将降低，与外界的温差会进一步拉大，将有更多的热辐射涌进黑洞。这样，黑洞会越来越大，温度越来越低，直至把外部的热辐射全部吸进去。

如果涨落的结果是黑洞比周围热辐射的温度高了一点，那么会有热能以辐射形式从黑洞射出。这时黑洞质量会减少，温度会进一步增高，这将导致更多的热量流出黑洞。于是黑洞会越来越小，温度会越来越高，往外的热辐射流会越来越大。最后小黑洞会发生爆炸，全部转化为不带信息的热辐射，以至黑洞完全消失。

上述过程是黑洞的负比热所决定的。一般物质的比热都是正的，一旦与外界达到热平衡，就会是稳定平衡。如果热涨落使物体温度略高于外界，物体的放热将大于吸热，正比热使它的温度降下来，重新与外界达到热平衡。如果热涨落导致物体温度略低于外界，物体的吸热将多于放热。这时，正比热使物体温度升高，重新与外界达到热平衡。

所以，一般物体由于比热为正，与外界的热平衡肯定是稳定平衡。上面描述的黑洞与外界热平衡为非稳平衡的情况，完全是黑洞的负比热造成的，可以说是黑洞的一个特有性质，其他物质罕有比热为负的情况。负比热导致的黑洞全部转化为热辐射的现象，会使锁在黑洞内部的信息真的从自然

界消失，黑洞过程真的会破坏信息守恒。这可是个严重问题！

量子论专家特别看重这一结论，因为现代量子理论建立在所谓“幺正性”之上，即建立在“概率守恒”的基础之上。在他们看来，信息不守恒将导致概率不守恒，从而破坏量子理论的幺正性。他们认为这是完全不可接受的！

相对论专家则觉得问题没有那么严重。物理学中原本没有“信息守恒定律”，信息不守恒也是完全可能的。所以，许多相对论专家认为，从黑洞理论看，信息真的不守恒。他们认为黑洞理论是正确的，信息不守恒就不守恒，没有什么了不起的。信息不守恒并不影响相对论的正确性。

2. 霍金打赌

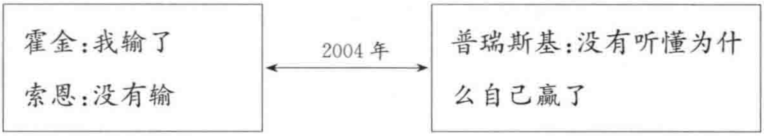
关于黑洞演化过程中信息是否守恒的争论持续了多年。1997年，以霍金和另一位相对论专家索恩为一方，以量子论专家普瑞斯基为另一方，就信息是否守恒的问题打了一场赌。霍金和索恩认为落入黑洞的物质的信息，最终丢失了，信息不守恒。普瑞斯基则认为落入黑洞的信息不会丢失，一定会以某种方式跑出来，或者永远保存在黑洞里面。

霍金、索恩：黑洞中的信息丢失了	←— 1997年 —→	普瑞斯基：黑洞中的信息不会丢失，会逸出或残留

霍金这个人十分爱开玩笑，他曾多次与别人打赌。有一次打赌，谁输了谁给对方订一年黄色杂志。后来，霍金宣布自己输了，让秘书买了一套黄色杂志送到对方家中，让对手的夫人十分不快。

这次他们没有赌黄色杂志，而是比较文雅，赌网球杂志。2004年，霍金突然宣布自己输了，认为黑洞过程不会破坏信息守恒。让助手买了一年板球杂志(没有买到网球杂志)给对方送去。那位以研究时空隧道和时间机器而闻名的索恩则不承认自己输了，他说：“这事也不能由霍金一个人说了算，

我不承认输了。”普瑞斯基则表示，自己没有听懂霍金的报告，没有弄明白自己怎么会赢了。



这件事发生于在爱尔兰召开的一次国际相对论研讨会上。在会上霍金作了一个高级科普式的报告，论述黑洞演化过程中信息为什么不会丢失。

霍金总的想法是，以前把黑洞想象得太理想了。真实的黑洞不像我们从理论算出的那样，真实的黑洞并没有那么黑，所以进入黑洞的信息都会跑出来。

这个高级科普报告中只有一个半公式，即一个公式和一个表达式(半边公式)。真的很难听明白其具体内容。不过霍金表示，他不久将发表一篇学术论文，包括详细的论证，来说明自己的思想和结论。但是，迄今为止，他仍没有发表这篇论文。有可能是他身体不好，那以后他一直健康状况欠佳。也有可能是他又犹豫了，改变了想法。科学家思想活跃，经常会改变想法。

有些记者当场调查了与会相对论专家对此事的看法。到会的近 100 位专家中，大多数认为黑洞过程不会破坏信息守恒，然而也有约三分之一的专家认为，黑洞过程信息不守恒。

实际上，在此次会议之前，许多主张信息守恒的物理学家就发表了不少科研论文，以论证落入黑洞的信息一定会以某种方式跑出来，或者霍金辐射会在黑洞小到某个质量、温度升到某个高度时突然截止。他们认为这可能是一种以前不知道的新的量子效应。由于这种量子效应，黑洞蒸发(即热辐射)截止，信息将作为“炉渣”永远残留在小黑洞内部，不会从宇宙中消失。

其中比较有影响的是诺贝尔奖获得者维尔塞克(因研究强相互作用的量子色动力学获奖)及其学生帕瑞克的工作。他们认为，以前证明黑洞具有霍金辐射的论文，包括霍金本人的论文，都无一例外地忽略了射出粒子对黑洞的“反作用”。具体来说，就是都没有考虑射出一个粒子后，黑洞就会减少

一个粒子的质量，因此黑洞半径将会有一个收缩，此收缩虽然非常非常小，却不应该忽略。这一收缩会给黑洞的热辐射谱造成微小的修正，大家不应小看这一点修正。这一点修正使辐射偏离了严格的黑体谱，从而会有一点信息跑出来。他们证明了考虑这一修正，就会使落入黑洞的信息跑出来，从而保证了信息守恒。

正是他们的工作，以及其他一些人关于信息守恒的论证，使包括霍金在内的许多相对论专家产生了动摇，不少人转而支持信息守恒。

3. 信息守恒吗

霍金这次打赌的消息被媒体传遍全球，引起许多人的关注。我和我的博士生张靖仪也对此很感兴趣。我们觉得，物理学中并没有“信息守恒定律”。

我们注意到，信息论专家认为信息是“负熵”，包括霍金在内的不少物理学家也赞成这一观点。然而，物理学中有一条热力学第二定律，此定律说熵不守恒，自然过程中的熵总是增加的。如果信息是“负熵”，按照热力学第二定律它就不会守恒，所以，“信息守恒”只不过是量子论专家一厢情愿的想法。这是因为“信息守恒”可以维持多年建设起来的量子论框架，使理论显得简洁美妙。但是，愿望归愿望。如果信息被视作“负熵”是正确的，那么“信息守恒定律”就会和热力学第二定律冲突，而第二定律是久经时间检验的。

历史上，热力学第二定律曾多次被人怀疑，然而此定律经受住了考验。19世纪时，由于看到有不少人怀疑第二定律，有一位物理学家说了一句俏皮话：“看来，还应该有一条物理定律，这条定律就是：热力学第二定律是不可推翻的。”

我和张靖仪认为，在“信息守恒”与“第二定律”之间，我们还是应该坚持第二定律，不应该受“信息守恒”的约束。我们猜测，帕瑞克等人的工作中一

定作了某种假设，正是这一假设，导致他们证出了黑洞辐射信息守恒的结论。

我们仔细研究了帕瑞克和维尔塞克等人的工作。由于他们是以最简单的球对称黑洞为例，仅考虑辐射最简单粒子来得出自己的结论的，所以我们首先是向他们学习，把他们的工作推广到各种黑洞，辐射各种粒子的情况，以充分理解他们的理论和方法。同时，我们也想从众多的例子中检查他们是否作了某种假设。

在此后的几年中，我们一共在这一领域发表了10篇论文，把他们的工作推广到各种情况。推广是成功的，这证明他们的计算方法和结果都是正确而严格的。同时，功夫不负有心人，在众多例子的探讨中，我们发现他们的证明方法中的确暗含了一个假定，那就是流出黑洞的热量 dQ 一定满足下式：

$$dQ = TdS \tag{14.2}$$

式中 T 是黑洞温度，S 是熵，dS 是熵的变化。此式只对热学中的"可逆过程"成立。"可逆过程"是一种自然界中并不存在的理想过程，此过程中熵守恒。真实的自然过程都不是可逆过程，对于"不可逆过程"，(14.2)式不成立，成立的是下式：

$$dQ < TdS \tag{14.3}$$

此式描述的过程熵不守恒，熵在不断增加，这应该对应信息(负熵)的不断减少。若采用(14.3)式，帕瑞克和维尔塞克得不出黑洞热辐射信息守恒的结论。

实际上，由于黑洞具有负比热，它和外界不能达成稳定的热平衡，所以黑洞与外界总是存在温差。存在温差的情况下，不管是外界热流(辐射)落入黑洞，还是热流从黑洞流出(即霍金辐射)，都肯定是不可逆过程，(14.2)式肯定不能用，可用的必定是(14.3)式。这就是说，帕瑞克等人的工作依旧未能证明黑洞过程信息守恒。黑洞过程是否信息守恒的争论还将继续下去。

我们上述论文中的一篇，获得了汤姆孙—路透集团颁发的"2008 科学前

沿—中国卓越研究奖”。

现在谈一下我们对黑洞信息疑难的看法：

(1) 自然界中不存在信息守恒定律。如果信息的确是负熵，则热力学第二定律将导致“信息不守恒”的结论。

(2) 霍金的意见有一定道理，以前我们的确把黑洞想象得过于理想。真实的黑洞辐射有可能偏离黑体谱，有可能从黑洞中带出部分信息，但未必是全部信息。所以，仍不能保证信息守恒。

(3) 以往对黑洞产生霍金辐射的证明，都是针对不随时间变化的黑洞。对这类静态或稳态的黑洞，在不考虑辐射反作用的情况下，确实可以证明辐射是严格的黑体辐射。然而，真实的黑洞都处在变化中，不断有霍金辐射跑出，也不断有外界物质落入。这样的动态黑洞的霍金辐射谱，似乎应该偏离黑体谱。不过，至今我们尚未能证明这一点。

4. 第一个虫洞：爱因斯坦—罗森桥

最近一段时间以来，随着“星际穿越”等一些描述时空隧道和时间机器的科幻电影的上映，在观众中引起了一阵“虫洞”热。可以穿越的虫洞，就是我们通常所说的时空隧道。这种虫洞内部的通道，可以大大拉近宇宙中相距很远的空间两点的距离，还有可能通往过去，通往未来。

是否存在这样的时空隧道，来使我们很快地前往远方，完成原来因距离遥远而无法完成的星际旅行？是否存在这样的时空隧道，使我们能够前往过去甚至前往未来？我们现在就来探讨这一问题。

首先，我们要说明，“虫洞”是广义相对论推导出的结果。最早提出这类时空通道的不是别人，正是相对论的缔造者爱因斯坦和他的助手罗森。

1935年，他们在用广义相对论推导出的一个时空模型中，发现在我们的宇宙之外，竟然还存在另一个宇宙，而且这两个宇宙之间有一个通道(图14-1)。图中的两个平面，各表示一个4维时空(即包含3维空间，还有1维时

间)，也就是说各是一个宇宙。图中每一张 2 维面代表一个 4 维时空。中间相连接的曲面管道，就是时空通道，或者说“虫洞”。不过，当时“虫洞”和时空隧道的名称还没有出现。爱因斯坦和罗森称其为“喉”，后人也称其为“爱因斯坦—罗森桥”。

需要注意的是，这个通道并非指管子中的空间，而是指管壁。管子中的空间属于更高维的空间，例如第 5 维空间。这个第 5 维空间究竟是怎么回事，目前还不能很好地说明。总之，图上的 2 维曲面本身，已经代表我们的 4 维时空了。其中Ⅰ、Ⅱ两个面，一个是我们的宇宙，另一个是未知的另外一个宇宙。它们的中间弯曲成一个管道，管道壁就是“喉”。“喉”把两个宇宙连接起来，形成一个通道。

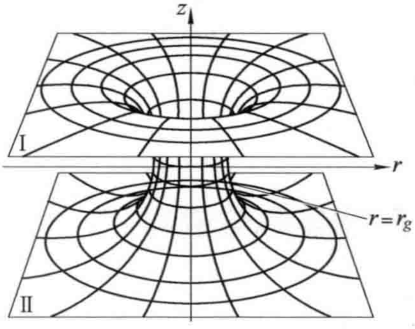


图 14－1　爱因斯坦—罗森桥

他们研究发现，这个通道是一个无法通过的通道。只有超光速运动的物体或者信号，才能穿越这个通道，而相对论禁止超光速运动。因此，这个“喉”无法成为两个宇宙间的真实通道。

所以，“爱因斯坦—罗森桥”就成了一个没有物理意义的数学模型，物理学家们渐渐对它失去了兴趣，只有一些数学家还在那里欣赏、推敲。

1957 年，美国物理学家惠勒和他的学生米斯纳首次提出“虫洞”这个名称，来描述时空通道，但他们研究的仍是不可穿越的时空通道。他们提出了一个有趣的想法，认为我们通常所说的“质量”和“电荷”，其实都是一些虫洞的洞口。也就是说，世上其实并没有质量和电荷，那不过是一些虫洞的洞口。因此他们提出，“没有质量的质量”和“没有电荷的电荷”的观点。今天看来，他们的这一观点可能是错误的，但他们的工作推动了对虫洞的进一步探索。

爱因斯坦—罗森桥是连接两个宇宙的虫洞，惠勒—米斯纳研究的则是

两个开口在同一宇宙中的虫洞(图 14－2)。但这都是些不可通过的虫洞。

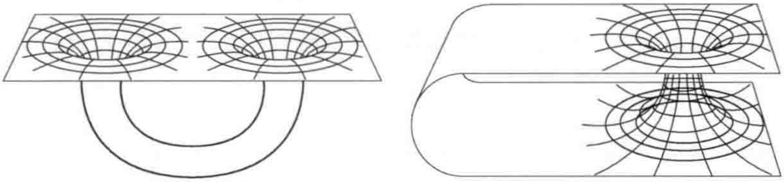


图 14－2　惠勒与米斯纳的虫洞

5. 宇宙泡与虫洞

在对广义相对论的进一步研究中,科学家们逐渐认识到,可能存在多个宇宙。我们观察和描绘的膨胀宇宙,不过是众多宇宙中的一个。这些宇宙之间可能有管道相通,也有的管道像“手柄”一样,两个开口在同一个宇宙中,这些管道就是“虫洞”(图 14－3)。

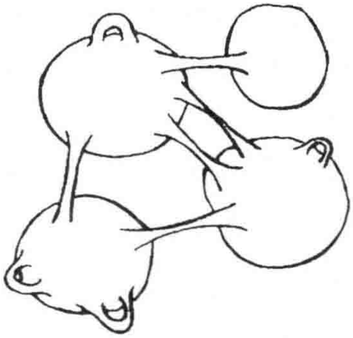


图 14－3　多个宇宙和连接它们的虫洞

研究认为,宇宙诞生的初期,由于量子效应猛烈,物质和时空处在沸腾的混沌状态。这时不断有“宇宙泡”从“混沌汤”中诞生,这些宇宙泡间往往有虫洞相连。有的泡诞生后又消失,但有一些泡逐渐胀大。在这些宇宙泡的膨胀过程中,“混沌汤”的温度不断降低,“混沌汤”中的“时空结构”逐渐冷却“凝固”下来,其中的宇宙泡成为一个个继续膨胀的宇宙,各宇宙间的虫洞也保留了下来(图 14－4)。这些虫洞有可能保留到今天,按照这种观点,当今的宇宙可能保留有虫洞。

这些理论模型,在数学和物理上并无错误,但这种模型是否符合实际,还需要天文观测去检验。这些宇宙间的虫洞,以及“手柄”式的虫洞,如果存

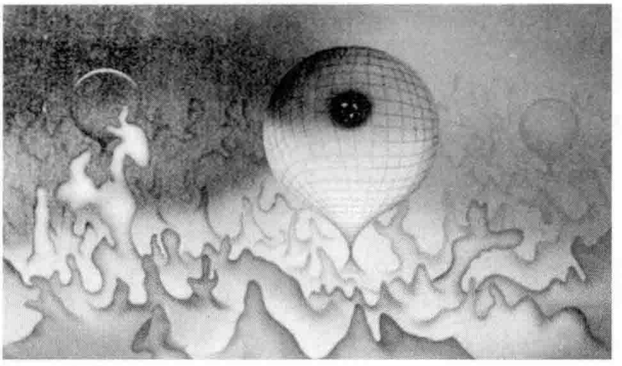


图 14-4　宇宙的极早期，宇宙泡和虫洞从混沌汤中诞生

在，是否可以穿越，也没有定论。研究长期处在理论探讨上，关注的人也不多。一般科学家都认为，这是些远离观测实际的"玄而又玄"的"天方夜谭"，探讨的意义不大。

6. 可以穿越的虫洞——时空隧道

1985 年，美国天文学家萨根发表了科幻小说《接触》，描述了穿越时空隧道的星际旅行。他认为时空隧道的洞口一个是黑洞，另一个是白洞，做星际旅行的人从黑洞进入，从另一端的白洞冒出，很短时间就越过了遥远的距离(图 14-5)。

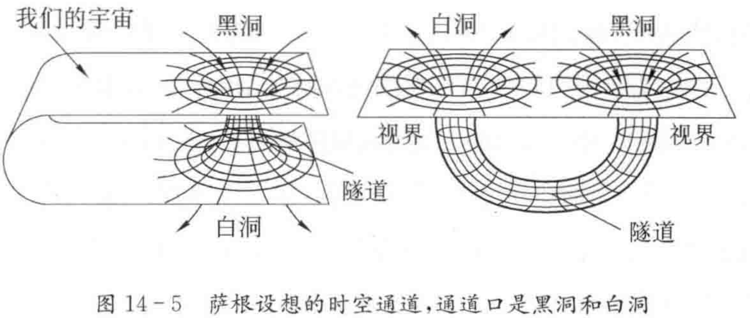


图 14-5　萨根设想的时空通道，通道口是黑洞和白洞

萨根是一位行星天文学家，不了解广义相对论。他不知道自己的设想是否有道理，就去问他的朋友，著名相对论专家索恩。索恩告诉他，黑洞内

部的时空通道并不稳定,飞船一经过,一扰动,通道就会堵死而中断。因此建议他,不要利用黑洞内部的时空通道,而干脆用虫洞做时空隧道。这件事激发了索恩对虫洞的兴趣,于是他也开始了对虫洞的深入研究。

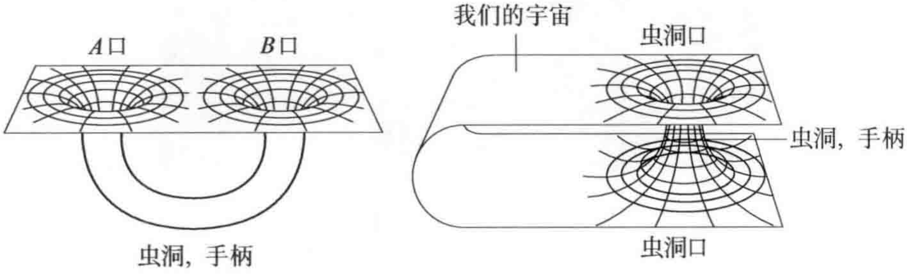


图14-6 索恩的可穿越虫洞——时空隧道

1988年,索恩和他的两位合作者发表了名为《时空中的虫洞及其在星际旅行中的用途》的论文,首次给出了对可以穿越的时空通道的研究。此后,有关这方面的论文大量涌现。他们的论文发表在《美国物理杂志》上。这是一本供中学物理教师阅读的教学杂志,索恩等人论文的发表,使这一杂志声名鹊起。

研究发现,广义相对论允许可以穿越的虫洞的存在。并发现,"可穿越虫洞"有两类,一类是欧几里得虫洞,另一类是洛伦兹虫洞。

欧几里得虫洞是一类瞬时穿越的虫洞,其过程经历的是"虚时间",不是我们通常用的实时间。所以,在我们看来,穿越欧几里得虫洞不需要时间。当这类虫洞的洞口碰到某个人时,这个人会立刻消失,一瞬间就从另一个洞口冒出。如果这两个洞口在同一宇宙的不同地点,例如一个洞口在地球,一个洞口在织女星附近,那么穿越的人会瞬间从地球消失,而在同一时刻出现在织女星附近。如果一个洞口在现代,另一个洞口在古代,例如在北京猿人生活的时代,那么这个人在碰到洞口时立刻消失,并立刻在古代的猿人群中冒出来。猿人们一看,怎么突然冒出一个穿着衣服还戴眼镜的人,非常奇怪!

洛伦兹虫洞是一种能够看见,能够长时间存在的虫洞。它的洞口就像一个球,可以在天空飘荡,也可以安装在某个地方。人进入这类虫洞的洞口

后，会发现洞内有一条时空隧道（即虫洞本身），通向远方。外部的人能看见人或飞船进入这个“球”（洞口），却看不见他们穿出来。这是因为时空隧道存在于5维空间中，也就是说，外部的人看不见这条隧道，只能看见隧道的洞口——球。

进入洛伦兹虫洞的人，可以通过这条时空隧道前往远方，或者前往“过去”，前往“未来”。

7. 时间机器

研究表明，时空中不仅可能存在从宇宙极早期的“混沌汤”中保留下来的时空隧道，而且似乎还有可能人工制造一些时空隧道。

这些天然的或人工制造的时空隧道，可以是欧几里得虫洞，也可以是洛伦兹虫洞。通过它们，可以迅速地抵达远方，使原本认为距离过于遥远（例如若干光年）而几乎无法完成的星际旅行，变得可能，而且似乎十分容易。

特别有意思的是还可以利用这些虫洞制造时间机器（图14－7），使一个人可以前往未来或者回到过去。

这些研究结果立刻引起了大众的兴趣，不少人开始编造各种故事，写成各式各样的科幻小说。

让人最难理解也最感兴趣的是时间机器，这种东西能让一个人返回自己的过去，这非常可能造成因果关系的破坏。

例如一个人高考成绩不理想，他设法通过虫洞返回到高考以前，把已经看过的高考题弄会，再重新参加已经过去的高考，于是原来做错的题又做对了，他高考成绩变成十分优秀了。第一次未考好，第二次考得十分好，到底哪一次是真实的呢？实在让人费解。

更难理解的是一个人回到了他父母结婚以前，想法把正在谈恋爱的父母拆散，真要这么做了，他又是怎么生出来的呢？如果此人是个坏小子，他返回过去之后，把生他之前的母亲杀死，那么他又是怎么生出来的呢？这样

的事情实在太荒唐了,令人无法接受。

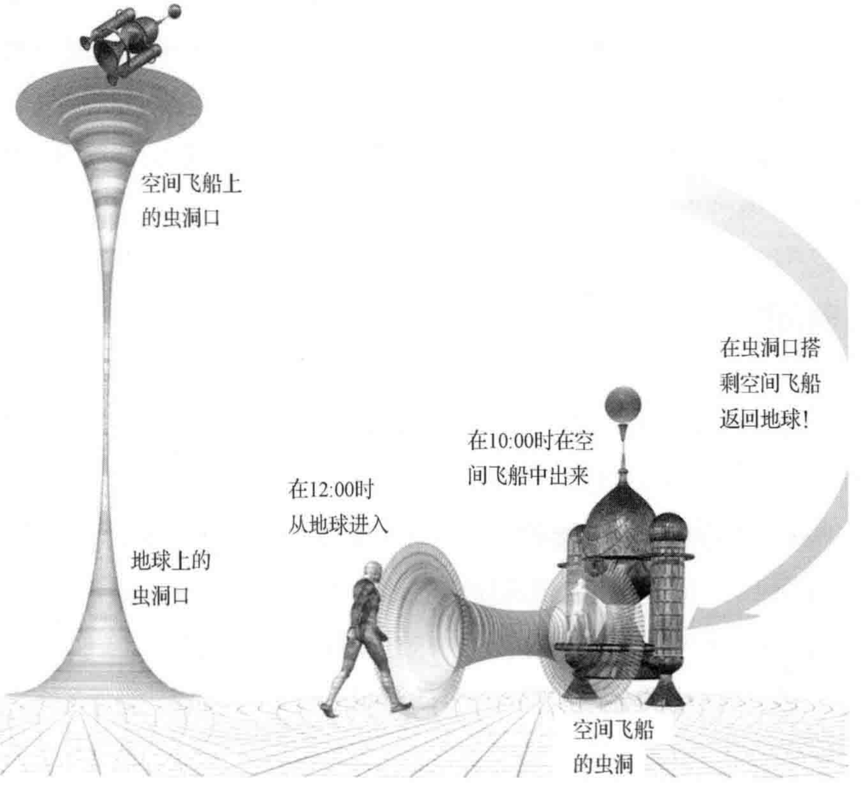


图 14-7 时间机器

所以,科学家们一致认为,应该有一条科学定律禁止这类破坏因果关系的现象产生。

霍金和诺维科夫对此提出了各自的看法。霍金认为应该有一条物理规律,不许人回到自己的过去。他认为这一规律可能与“时空边界”处的“应力”有关。但有人对他的看法提出了异议。诺维科夫则认为,人也许可以回到自己的过去,但应该有一条定律保证他不能改变自己的过去。总之,大家都认为因果关系绝对不能破坏。但这些阻止因果关系破坏的物理规律究竟是什么,谁也说不清楚。

有关研究仍在进行中。

8. 形成虫洞的苛刻条件

令人欣慰的是，目前的研究表明，形成虫洞的条件十分苛刻，尤其是形成可穿越的虫洞（包括时间机器在内的各种时空隧道），条件苛刻到几乎无法实现。

有些研究表明，撑开一个虫洞需要大量负能物质。撑开一个半径 1 cm 的虫洞，需要相当于地球质量的负能物质；撑开一个半径 1 km 的虫洞，需要相当于太阳质量的负能物质；撑开一个半径 1 光年的虫洞，需要相当于银河系发光物质总量 100 倍的负能物质。如果有外力作用在负能物质构成的物体上，这个物体将反向运动，即逆着力的方向运动。反物质和暗物质的质量都是正的，它们都不是负能物质。暗能量也不是负能物质。负能物质我们了解得还不多，目前我们只在一些十分精细的物理效应中观测到一些负能量，从质能关系 $E=mc^2$ 看，它们的质量应该是负的，但其数量微乎其微。我们还没有在宇宙中观察到数量比较多的负能物质。所以寻找足够数量的负能物质来撑开一个可以穿过的虫洞，是十分困难的事情。

有些人觉得，如果找到相当于太阳质量的负能物质，撑开一个半径 1 km 的虫洞，飞船就足以飞过去了。但是，不行。这是因为虫洞中有强大的张力（负压强），飞船飞过时必须要能抵抗住这种张力。研究表明，半径越小的虫洞，内部张力越大。飞船在半径 1 km 的虫洞中肯定会被张力撕碎，不仅船体会被撕碎，甚至组成飞船的物质的原子都会被撕碎。原子不会被撕碎的虫洞至少要半径 1 光年以上。前面说到，撑开半径 1 光年的虫洞需要相当于银河系发光物质总量 100 倍的负能物质，到哪里去找这么多的负能物质？而且，这么粗的虫洞还仅仅是保证原子不被撕碎，还不能保证人和飞船不被撕碎。

有人认为，我们可以不让人的实体通过虫洞，而是让他的信息通过虫洞。我们可以把人进行全息扫描，然后把信息发过虫洞，虫洞那一端的人收

到这些信息后，可以在那边重新重装一个相同的人，好在就我们所知，宇宙中的元素到处都是相同的。然而，重新复制一个同样的人何其困难，不仅要物质结构相同，还有他的思想、知识和整个意识也要相同，做这样的复制完全是天方夜谭。

当然，上述关于撑开虫洞的研究还只是初步的，人们可以寄希望于进一步的研究，我们也许能找到不需要负能物质就能撑开的虫洞，也许能找到内部没有强大张力的虫洞。

对时空隧道和时间机器的理论研究仍在进行中。我们相信，无论如何，破坏因果关系的现象绝对不会出现，一定有一条自然规律，保证因果性成立。

9. 不可忽视的热学定律

我们需要有一条自然定律来禁止对因果性的破坏。然而，这是一条什么定律却众说纷纭。

笔者认为，自然界的基本定律不会太多，这条我们希望存在的定律很可能是一条我们已知的定律。笔者猜测，它很可能就是热力学第二定律。这条定律指出时间有一个流逝的方向，只能从过去流向未来，绝不可能从“未来”返回“过去”。在讨论黑洞的面积定理和信息疑难的时候，我们都曾谈到这一定律。

在学术上，这条定律有几个等价的表述：

(1) 热量只能自发地从高温物体流向低温物体；不可能从低温物体流向高温物体而不引起其他变化。

(2) 不能从单一热源吸热，把热量全部转化为功，而不产生其他影响。

这一提法否定了第二类永动机存在的可能性。众所周知，第一类永动机违反能量守恒定律(即热力学第一定律)，企图使能量无中生有。第二类永动机不违反能量守恒定律，但企图利用单一热源吸热来对外做功。事实

上，热力学第一、第二定律的发现都与制造永动机的企图有关。这两条定律堵塞了制造永动机的可能性。

第一定律保证了一个守恒的、重要的物理量——能量的存在。它指出能量可以从一种形式转变为另一种形式（例如从机械能转换成热能、电能、光能等），但其总量保持不变。所以这一定律又叫作“能量守恒与转换定律”。

研究发现，第二定律保证了另一个重要的物理量——熵的存在。但熵与能量不同，熵不是守恒量。熵是什么？在历史上曾引起广泛讨论，现在我们已经清楚，熵是“混乱度”的量度。在自然界中，熵只能增加，不能减少。正是熵的增加，体现了时间的流逝。

热力学第二定律的第三种提法是：

(3) 在孤立系统和绝热系统(即与外界没有热交换的系统)中，熵只能增加不能减少。

热力学定律的重要之处在于它们是普适的，适用于力学、电磁学、光学、原子物理、核物理等所有物理过程，也适用于化学、生物学等所有自然科学领域。这是其他学科和理论都望尘莫及的。电磁理论只适用于电磁领域，力学理论只适用于力学领域……这些理论都是各自独立、互不约束的。但热力学却渗透到所有这些领域中。

例如，一般人都知道，上述所有领域中的规律都必须满足能量守恒定律。

10. 热学精英的悲喜剧：热力学第一定律的发现

热力学定律如此重要，应用如此广泛，但它们的提出却历尽辛酸。

热力学第一定律的发现者一共有三个人：迈尔、焦耳和赫姆霍兹。

迈尔是德国的一个生物学家。他在当随船医生到热带地区考察的时候，注意到在热带地区和温带地区，人和动物血液的颜色不同，在热带要更

鲜艳一些。他就此进行深入研究,认识到这与食物的氧化情况有关,进而提出能量的概念,并指出能量可以从一种形式转换为另一种形式,但总量守恒。

他把论文投给一个物理杂志,但由于他的思想非常新颖,而他又不是物理专业出身,论文中的语言名词并非物理专业所用,因此杂志社没有人能看懂,他的论文被压下不发表。天真的迈尔以为自己投了稿,杂志一定会刊登,所以每当这家杂志出版的时候,他都跑到图书馆去查阅,希望在上面看到自己的文章。然而,一次次的希望变成一次次的失望,他终于意识到,这家杂志不会刊登他的文章了。于是他转而求助于一家生物学杂志,他的一个朋友在这家杂志社当编辑。他终于说服朋友,刊登了他的文章。当他又写了第二篇文章,再次请朋友帮忙的时候,朋友不得不告诉他,由于刊登他的文章,自己遭到许多生物学家的指责:“这是生物方面的文章吗?”“为什么在生物杂志上登这种乱七八糟的文章?”朋友遗憾地告诉迈尔,他实在无法再帮忙了。

迈尔的倒霉事一件接着一件,先是弟弟因搞革命活动被捕,然后是两个儿子夭折,自己的成果又无人理解,在悲痛与失望的情绪下,他跳楼自杀,摔断了双腿。人们认为他有精神病,把他送进了精神病院。不过还好,若干年后,迈尔的伟大成就终于被世人认可了。

焦耳是英国人,他是一个啤酒厂厂主的儿子,自己后来也子继父业,成为啤酒厂的老板。不过他的主要兴趣不在啤酒生意上,而在物理学上。他在对物理现象,特别是电和热的研究中,独立地发现了热力学第一定律。但由于他非物理专业出身,论文中的用语都不是物理学中的术语,他的文章没有得到物理学家的支持,他只好把文章刊登在小报上。幸运的是物理学家开尔文看到了他的文章,觉得很有意思,但由于他用的不是物理术语,开尔文觉得有的地方自己还看不大懂,于是他拜访了焦耳。听了焦耳的解释,开尔文终于理解了。开尔文认识到他的工作非常有创新性,非常重要,于是向物理界推荐了焦耳的工作。焦耳终于被允许参加了一次物理研讨会,但只

被允许做小组发言。他的发言仍然术语不对,大家莫名其妙,幸亏开尔文做了即席发言,对焦耳的工作做了解释说明,大家才恍然大悟,终于接受了焦耳的重大发现。

赫姆霍兹也是德国人。他是物理学家,他的论文对第一定律做了最清楚的表述。

11. 革命风暴中的科学:第二定律的发现

热力学第二定律的发现者有两位:法国的卡诺和德国的克劳修斯。

卡诺生活在法国大革命时期,他的父亲是一位数学家,曾任革命政府的陆军部长。当时大革命的浪潮汹涌澎湃,深刻鼓舞着法国人民,许多学者和普通人一起投入了革命的洪流。另一位数学家蒙日(画法几何的创始人),担任了革命政府的海军部长。化学家富克鲁瓦担任了革命政府的火药局局长。

当然,也不是所有的科学家都站在了革命队伍中,著名的化学家拉瓦锡就没有切断与保皇党的联系,在革命最"疯狂"的时期,他被革命政府送上了断头台。拉瓦锡的死,是科学事业和法国人民的重大损失。数学家拉格朗日就说:"砍下拉瓦锡的头只需要一瞬间,但法国100年也别想再长出这样一个头了。"3年后,革命政府为拉瓦锡平反,给他树立了半身铜像,但这个铜像无法像活人那样思考,法国永远失去了一位伟大的学者。

拿破仑是一位革命的独裁者,他把资本主义的种子撒遍欧洲。拿破仑一直重视科学的发展,在英、法严重敌对期间,他仍热情接待来访的英国学者戴维。甚至在即将失败的时候,拿破仑也不肯让大学生走上前线,他说他要珍惜这些能下金蛋的鸡。

卡诺的父亲后来又当了拿破仑的国防部长。拿破仑失败后,他被复辟的保王党政府流放到远方,这对在军事工程学院学习的卡诺产生了巨大影响。由于"出身不好",他被赶出了学院,并不许他接触任何军事方面的东

西。这一厄运反而成就了卡诺，他开始潜心研究热机效率。

当时能量概念尚未提出，流行的热学理论是“热质”说，认为热机就像被水推动的水轮机一样，被从高温热源流向低温热源的“热质”所推动。

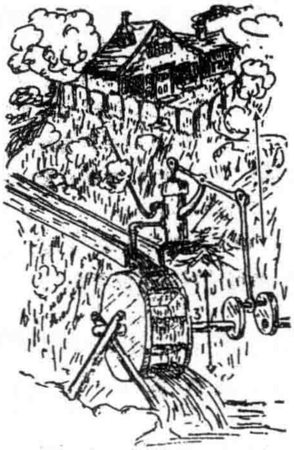


图 14-8　热质说：热机与水轮机的对比

卡诺用错误的热质说，证明了他的著名定理——卡诺定理(14.4)。这一定理，其实也是热力学第二定律的一种表述。

$$\eta \leqslant 1-\frac{T_2}{T_1} \tag{14.4}$$

式中 η 是热机效率，T_1 是高温热源的温度，T_2 是低温热源的温度。等号对应于理想的可逆过程。不等号对应于不可逆过程。真实的热机运转过程一定是不可逆过程。

卡诺非常不幸，特别是在他 36 岁那一年。这年的 6 月，他患了猩红热和脑膜炎，8 月又得了当时最可怕的传染病霍乱，终于不治身亡。他死后，由于怕传染，家中把他的所有遗物包括笔记、论文手稿全部烧毁。幸运的是，他的一个笔记本被遗忘在阁楼上，而于40年后被他的弟弟发现。从这本笔记中可以看到，卡诺当时已对热质说产生了怀疑，他已经认识到热可能是能量。

1850 年，克劳修斯提出了第二定律的标准说法，即“热量只能自发地从高温物体流向低温物体，而不能自发地从低温物体流向高温物体”。

实际上，开尔文也几乎与此同时发现了第二定律，他的表述形式就是“不能从单一热源吸热做功，而不对外界产生影响”。开尔文的表述发表在1851 年。开尔文对热学的贡献很多，包括提出绝对温标，预见到可能有热力学第三定律的存在，即绝对零度有可能达不到。

开尔文是一位品德高尚、才华横溢的谦虚学者，从不与人争夺名利，并乐于提携、帮助别人，他推荐过焦耳，后来还推荐过皮埃尔 · 居里(著名的居

里夫人的丈夫)。

12. 第三定律与奇点疑难

热力学第三定律说,“不可能用任何操作使系统的温度降到绝对零度。”实际上就是说“绝对零度不可能达到”。提出这条定律的只有一个人,那就是德国的能斯特。

有趣的是,能斯特最初是从热力学第二定律推出上述结论的。在能斯特做报告时,年青的爱因斯坦指出,他的结论是正确的,但推导有问题。爱因斯坦认为,能斯特的结论是一条独立的热力学基本定律,不可能从第二定律推出。能斯特起初还不服气,后来终于弄清楚了自己的发现的重大意义。

第十三章第 6 节中谈到的“奇点定理”曾引起过笔者极大的兴趣。这条定理断言,在广义相对论成立的任何一个物理时空中,只要因果性在其中成立,而且有一点物质存在,那么在其中就一定存在时间有开始或结束的过程。时间有没有开始和结束,自古以来有不少思想家感兴趣,但那都是些哲学家和神学家,我们可以不去管它。但现在物理学家站出来断言时间有开始和终结,那问题就必须重视了。

笔者花了很多时间去思考这个问题,并很快注意到黑洞理论中的一个情况:凡是奇点存在的场合,都会伴随温度发散或达到绝对零度的情况出现。实际的物理系统,温度不可能达到无穷大,“绝对零度”又是热力学第三定律所禁止的。于是笔者提出一个大胆的猜想:热力学第三定律会禁止奇点存在,也就是说,第三定律会禁止时间有开始和结束。

为此我们进行了认真的研究,在国内外杂志上发表了不少论文。感兴趣的读者可参看作者在下一节中列出的文献。

13. 第零定律与“同时的传递性”

有人开玩笑说,热力学第一定律的发现者有三个人,第二定律的发现者

有两个人,第三定律的发现者只有一个人。按此规律来看,不应该有热力学第四定律存在,因为第四定律的发现者人数应该是零。

不过,热力学虽然没有第四定律,却有一个第零定律。该定律说“热平衡是可以传递的。”也就是说,“如果系统A与B达到热平衡,B与C也达到热平衡,那么A与C就一定达到了热平衡。”

人们逐渐认识到“热平衡具有传递性”应该是一条基本定律,但这是在第一定律和第二定律确立之后。由于没有这条新定律,就不能定义热学中最重要的概念——温度,所以这条定律不仅重要,而且从逻辑上看应该排在第一定律和第二定律之前,因此,人们只好称它为热力学第零定律。

有人说,“热平衡具有传递性”应该是当然的事情,这条定律简直是一句废话。其实“废话”和“真理”并没有严格的界限。如果一条规律或者一个结论,没有人知道,你首先说了出来,那就是真理。如果大家都知道,你还在那里说,那就是废话了。

有趣的是,笔者在相对论的研究中发现,还真的存在“热平衡不具有传递性”的可能。这样看来,第零定律就完全不是废话了。

事情还要从1978年说起。那一年的夏天,作为改革开放后的第一届研究生,笔者进入北京师范大学天文系,开始追随刘辽先生学习广义相对论。他在讲课中谈到,爱因斯坦在他开创相对论的第一篇论文中,曾经讨论过,在同一参考系中位于不同地点的钟如何校准的问题。他提出一条公理:A点的钟如果与B点的钟校准,B点的钟再与C点的钟校准,那么A、C两点的钟就自然校准了。也就是说,他假定“同时”这个概念具有传递性。后来,苏联物理学家朗道指出,这条看似当然成立的“公理”,其实不一定在任何参考系中都成立。他指出:只有在“时轴正交系”,也就是说时间轴和三条空间轴都垂直的参考系中才成立。在非时轴正交系中,“同时”不具有传递性。例如转动的圆盘,时间轴就与空间轴不都垂直,因此“同时”不具有传递性。在转盘上不能定义统一的时刻。

朗道的结论引起笔者极大的兴趣,想不到天下竟有如此奇怪的事情:A

点与 B 点的钟对好，B 点与 C 点的钟也对好，再一看，A 钟与 C 钟却没有对好。这件怪事笔者长久不能忘怀。我想：物理学中还有没有类似关于传递性的事情呢？于是想到了热力学第零定律。我猜想："热平衡的传递性"会不会与"同时的传递性"有关呢？经过反复思考与尝试，笔者提出了一个新概念："钟速同步的传递性"。即不要求各点的钟时刻对好，只要求它们的快慢对好，即"钟速"对好。笔者还进一步证明，"钟速同步的传递性"与热力学第零定律，即与"热平衡的传递性"等价。这使得热力学第零定律的成立不仅可以定义"温度"这个热学概念，还可以定义"时间"这个概念。

顺便说一下，位于匀速转动的转盘上各处的钟，虽然不能定义统一的时刻，但却可以定义统一的钟速。所以，在这种转盘上，热力学第零定律依然成立，依然可以定义温度。

对这方面感兴趣的读者，可参看有关书籍和论文，例如笔者所写的《物含妙理总堪寻》和《看不见的星》等科普书，或《广义相对论基础》《弯曲时空中的黑洞》以及《黑洞与时间的性质》等学术书籍。

14. 热与时间

从上述讨论可以看出，广义相对论中的信息疑难、虫洞疑难和奇点疑难，都把我们对时空的研究引向了热力学。看来，"热"与"时间"之间很可能存在我们尚不清楚的深刻的本质联系。

物理学的研究早就指出，能量守恒，也就是热力学第一定律可以保证时间流逝的均匀性；热力学第二定律指出了时间的方向性和流逝性。我们这里谈到的探索又表明，热力学第三定律似乎能够保证时间没有开始和结束；第零定律则可以保证空间各点存在流逝速率相同的时间。

这是一个令人感兴趣的领域，有待人们去进一步探索。

主要参考书目

1. A. 爱因斯坦.狭义与广义相对论浅说[M].杨润殷译，胡刚复校.北京：北京大学出版社，2006.

2. S.W. 霍金.时间简史[M].许明贤，吴忠超译.长沙：湖南科学技术出版社，1994.

3. R.彭罗斯.皇帝新脑[M].许明贤，吴忠超译.长沙：湖南科学技术出版社，1994.

4. S.W. 霍金.霍金讲演录[M].杜欣欣，吴忠超译.长沙：湖南科学技术出版社，1994.

5. S.W. 霍金，R.彭罗斯.时空本性[M].杜欣欣，吴忠超译.长沙：湖南科学技术出版社，1996.

6. 陶宏.每月之星[M].上海：开明书店，1949.

7. 伏龙卓夫・维略明诺夫.宇宙[M].郑文光译.北京：中国青年出版社，1958.

8. J-P. 卢米涅.黑洞[M].卢炬甫译.长沙：湖南科学技术出版社，1997.

9. K.S. 索恩.黑洞与时间弯曲[M].李泳译.长沙：湖南科学技术出版社，2000.

10. I. 诺维科夫.时间之河[M].吴王杰，陆雪莹译.上海：上海科学技术出版社，2001.

11. P.C.W. 戴维斯.关于时间[M].崔存明译.长春：吉林人民出版社，2002.

12. H. 彭加勒.科学与假设[M].李醒民译.北京：商务印书馆，2006.

13. 赵峥.探求上帝的秘密[M].北京:北京师范大学出版社,2009.(2013年新版更名为《探求宇宙的秘密》).

14. 赵峥.物理学与人类文明十六讲[M].北京:高等教育出版社,2008.

15. 郑庆璋,崔世治.相对论与时空[M].太原:山西科学技术出版社,1998.

16. 邓乃平.懂一点相对论[M].北京:中国青年出版社,1979.

17. 陈应天.相对论时空[M].庆承瑞译.上海:上海科技教育出版社,2008.

18. 吴鑫基,温学诗.现代天文学十五讲[M].北京:北京大学出版社,2005.

19. 陆埮.宇宙[M].长沙:湖南科学技术出版社,1994.

20. S. 温伯格.最初三分钟[M].冼鼎钧译.北京:科学出版社,1981.

21. 倪光炯,王炎森,钱景华,方小敏.改变世界的物理学[M].上海:复旦大学出版社,1998.

22. I. 普里戈金.从存在到演化[M].曾庆宏,严士健,马本堃等译.上海:上海科学技术出版社,1986.

23. 王允然,褚耀泉.从牛顿定律到爱因斯坦相对论[M].北京:科学出版社,1982.

24. J. V. 纳里卡.轻松话引力[M].卢炬甫译.长沙:湖南教育出版社,2000.

25. 徐一鸿.爱因斯坦的玩具——探寻宇宙和引力的秘密[M].张礼译.北京:清华大学出版社,2013.

26. 梁灿彬,曹周键.从零学相对论[M].北京:高等教育出版社,2013.

27. 卢昌海.那颗星星不在星图上——寻找太阳系的疆界[M].北京:清华大学出版社,2013.

28. 卢昌海.小楼与大师——科学殿堂的人和事[M].北京:清华大学出版社,2014.

29. 赵峥.相对论百问[M].北京:北京师范大学出版社,2010.

30. 赵峥.物含妙理总堪寻[M].北京:清华大学出版社,2013.

31. 赵峥.看不见的星——黑洞与时间之河[M].北京:清华大学出版社,2014.

32. 赵峥.弯曲时空中的黑洞[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2014.

33. 张轩中,黄宇傲天.日出——量子力学与相对论[M].北京:清华大学出版社,2013.

34. C. H.Lineweaver, T. M.Davis. Misconceptions about the big bang. in *Scientific American*, March 2005, P36.

35. 郭中一.科学,从好奇开始[M].台北:文经社,2005.

36. 沃尔特·艾萨克森.爱因斯坦传[M].张卜天译.长沙:湖南科学技术出版社,2012.

37. 郭奕玲,沈慧君.物理学史(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2005.

38. 吴国盛.科学的历程[M].长沙:湖南科学技术出版社,1995.

39. A. 派斯.爱因斯坦传[M].方在庆,李勇等译.北京:商务印书馆,2006.

40. 乔治·伽莫夫.物理学发展史[M].高士圻译.北京:商务印书馆,1981.

41. 董光壁,田昆玉.世界物理学史[M].长春:吉林教育出版社,1994.

42. M. 怀特,J. 格里宾.斯蒂芬·霍金的科学生涯[M].洪伟译,周环校.上海:上海译文出版社,1997.

43. A. 爱因斯坦.相对论的意义[M].李灏译.北京:科学出版社,1961.

44. 王允然,李淑娴.力学概论[M].合肥:安徽科学技术出版社,1986.

45. 赵峥,刘文彪.广义相对论基础[M].北京:清华大学出版社,2010.

46. 刘辽,赵峥,田贵花,张靖仪.黑洞与时间的性质[M].北京:北京大学出版社,2008.

[General Information]
书名=爱因斯坦与相对论：写在“广义相对论”创建100周年之际
作者=赵峥著
页数=236
SS号=13881027
DX号=
出版日期=2015.07
出版社=上海教育出版社